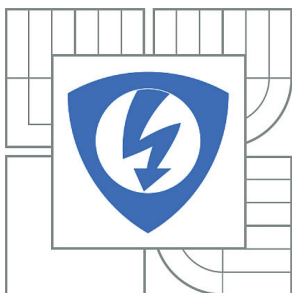


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

HODNOCENÍ OPTICKÝCH PRVKŮ PRO LED

EVALUATION OF OPTICAL COMPONENTS FOR LED

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

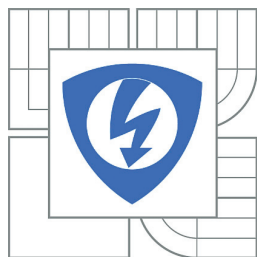
Bc. JIŘÍ DOBIÁŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ŠKODA, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Jiří Dobiáš

ID: 119384

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení optických prvků pro LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši týkající se dané problematiky.
2. Změřte jednotlivé kombinace optik s předloženými typy LED.
3. Se zaměřením na účinnost, úpravu světelného toku a barevné vlastnosti světla měření vyhodnoťte.
4. Vytvořte doporučené použití pro jednotlivé kombinace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

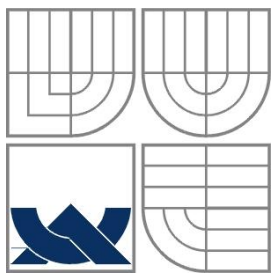
Bibliografická citace práce:

DOBIÁŠ, J. *Hodnocení optických prvků pro LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za inspiraci, vedení, pomoc při řešení úkolů a za asistenci v laboratoři světelné techniky. Rovněž děkuji společnosti LED-SOLAR, s.r.o. a panu Ing. Jánů Čorňákovi za poskytnutí vzorků LED a optických prvků. Na závěr bych poděkoval Bc. Jakubu Armovi za pomoc při tvorbě skriptu v programovacím jazyce Python.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

Hodnocení optických prvků pro LED

Jiří Dobiáš

vedoucí: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Evaluation of optical components for LED

by

Jiří Dobiáš

Supervisor: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá hodnocením optických prvků pro LED na základě laboratorního měření dostupných vzorků LED a optických prvků. Hodnocení je provedeno dle zavedených standardů se zaměřením na účinnost a úpravu světelného toku (vyzařovací úhel, křivky svítivosti). Navíc byla zpracována studie vlivu optického prvku na barevné vlastnosti LED (teplota chromatičnosti, spektrální charakteristiky). Na závěr je uveden přehled použití optických prvků a doporučený postup volby vhodné kombinace LED a optického prvku.

KLÍČOVÁ SLOVA: LED, optika, TIR optika, optický prvek, čočka, refraktor, hodnocení, měření, vliv, FWHM, křivky svítivosti, metoda zonálních toků

ABSTRACT

This thesis deals with an evaluation of optical components for LED, which is based on laboratory measurements of available LED samples and optical elements. The evaluation is done according to established standards and is focused on efficiency and adjustment of luminous flux (beam angle, luminous curve). Furthermore was made a study engaged in an optical element influence on LED color properties (color temperature, spectral characteristics). In conclusion there is an optical elements usage overview and recommended procedure for selecting appropriate combination of LED and optical element.

KEY WORDS:

LED, optics, TIR optics, optical element, lens, refractor, evaluation, measurement, influence, FWHM, luminance curve, the method of zonal flows

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	15
1.1 CÍLE PRÁCE	15
2 FOTOMETRICKÉ VELIČINY	16
2.1 OSVĚTLENOST	16
2.1.1 MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI	17
2.1.2 MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI OD MALÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	19
2.2 SVÍTIVOST.....	20
2.2.1 SYSTÉM FOTOMETRICKÝCH ŘEZNÝCH ROVIN.....	20
2.2.2 GONIOFOTOMETR.....	21
2.2.3 PODMÍNKY UŽITÍ ČTVERCOVÉHO ZÁKONA	22
2.2.4 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI	23
2.3 SVĚTELNÝ TOK.....	24
2.3.1 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU POMOCÍ INTEGRÁTORU S FOTOČLÁNKEM.....	24
2.3.2 URČENÍ SVĚTELNÉHO TOKU Z KŘIVEK SVÍTIVOSTI – METODA ZONÁLNÍCH TOKŮ.....	26
2.4 OSTATNÍ POŽADAVKY NA SVĚTELNÉ ZDROJE	28
2.4.1 INDEX PODÁNÍ BAREV	28
2.4.2 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI	29
2.4.3 MĚRNÝ VÝKON	29
3 OPTICKÉ PRVKY PRO LED.....	31
3.1 ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH PRVKŮ	31
3.1.1 POPIS OPTICKÝCH PRVKŮ.....	31
3.2 PARAMETRY CHARAKTERIZUJÍCÍ OPTICKÉ PRVKY.....	32
3.2.1 ÚČINNOST	32
3.2.2 VYZAŘOVACÍ ÚHEL.....	33
3.2.3 HODNOTA CD/LM	34
3.2.4 ARCHIVACE NAMĚŘENÝCH DAT	34
4 SMĚRNICE	35
4.1 SMĚRNICE CIE 127:2007.....	35
4.1.1 KATEGORIE MĚŘENÍ LED	35
4.1.2 VLIVY NA FOTOMETRICKÉ VELIČINY	35
4.1.3 GEOMETRICKÁ A OPTICKÁ OSA	36
4.1.4 PRŮMĚRNÁ SVÍTIVOST LED	37
4.1.5 ČÁSTEČNÝ SVĚTELNÝ TOK	37
5 PRAKTICKÁ ČÁST.....	39
5.1 NÁVRH GONIOFOTOMETRU	39

5.2 NÁVRH UPÍNACÍHO SYSTÉMU GONIOFOTOMETRU	39
5.3 PRACOVNÍŠTĚ	40
5.3.1 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ A MĚŘENÉ VZORKY	41
5.4 POSTUP MĚŘENÍ	42
5.4.1 INSTALACE LED DO GONIOFOTOMETRU	42
5.4.2 KALIBRACE SPEKTROMETRU	42
5.4.3 NASTAVENÍ PROGRAMU AVASOFT© 7.3 – 2008 AVANTES	43
5.4.4 MĚŘENÍ POMOCÍ PROGRAMU AVASOFT	44
5.5 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	45
5.5.1 ZPRACOVÁNÍ V EXCELU	46
5.5.2 ZPRACOVÁNÍ V MATLABU	51
5.5.3 FORMÁT EULUMDAT A JEHO ZOBRAZOVÁNÍ	51
6 HODNOCENÍ OPTICKÝCH PRVKŮ	53
6.1 ÚVOD DO HODNOCENÍ OPTICKÝCH PRVKŮ	53
6.2 KŘIVKY SVÍTIVOSTI	53
6.2.1 VYHODNOCENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTÍ OPTICKÝCH PRVKŮ	53
6.2.2 ÚČINNOST OPTICKÝCH PRVKŮ	54
6.2.3 VYZAŘOVACÍ ÚHEL OPTICKÝCH PRVKŮ	54
6.2.4 HODNOTA CD/LM OPTICKÝCH PRVKŮ	55
6.3 VLIV OPTICKÉHO PRVKU NA TEPLotu CHROMATIČNOSTI LED	55
6.4 VLIV OPTICKÉHO PRVKU NA SPEKTRÁLNÍ PRŮBĚH LED	57
7 OPTICKÁ SOUSTAVA LED S OPTICKÝM PRVKEM	58
7.1 VYUŽITÍ OPTICKÝCH PRVKŮ	58
7.2 VOLBA VHDNÉ KOMBINACE LED A OPTICKÉHO PRVKU	59
7.2.1 DLE POŽADAVKU ZÁKAZNÍKA	59
7.2.2 NA ZÁKLADĚ NAMĚŘENÝCH DAT OPTICKÝCH PRVKŮ	60
7.2.3 TŘÍDĚNÍ OPTICKÝCH PRVKŮ	60
8 ZÁVĚR	65
8.1 SOUČASNÝ STAV	65
8.2 SHRUTÍ POZNATKŮ PRÁCE	65
8.3 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	66
POUŽITÁ LITERATURA	67
SEZNAM PŘÍLOH	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Luxmetr PRC Krochmann Radiolux 111 [11]</i>	18
<i>Obr. 2-2 Ilustrace postupu měření intenzity osvětlení [5]</i>	19
<i>Obr. 2-3 Soustava fotometrických polorovin C-γ [48]</i>	21
<i>Obr. 2-4 Ukázka goniofotometru a) s otočným zdrojem a pevným fotometrem, b) s pevným zdrojem a otočným fotometrem, c) s rotujícím zrcadlem [5][14]</i>	22
<i>Obr. 2-5 Stanovení minimální fotometrické vzdálenosti [15]</i>	23
<i>Obr. 2-6 a) Křivky svítivosti svítidla v rovinách C0 a C90 v ortogonálních souřadnicích b) 1. křivka svítivosti v kartézském souřadnicovém systému; 2. a její aproximace [5]</i>	24
<i>Obr. 2-7 Náčrt uspořádání integračního kulového fotometru [2]</i>	25
<i>Obr. 2-8 Fotografie kulového integrátoru v laboratoři EZU [4]</i>	26
<i>Obr. 2-9 Prostorový úhel v souřadnicích α, γ [9]</i>	27
<i>Obr. 2-10 Prostorový úhel kulového vrchlíku a kulového pásu [9]</i>	27
<i>Obr. 2-11 Spektrum ideálního světelného zářiče [24]</i>	29
<i>Obr. 2-12 Teplota chromatičnosti teplé bílé a studené bílé LED [23]</i>	29
<i>Obr. 2-13 Vývoj měrných výkonů vybraných světelných zdrojů [26]</i>	30
<i>Obr. 3-1 Princip reflektoru, refraktoru, rozptylovače a složeného optického systému [8]</i>	31
<i>Obr. 3-2 Fresnelova čočka [37]</i>	32
<i>Obr. 3-3 Určení vyzařovacího úhlu optiky dle standardu FWHM [39]</i>	33
<i>Obr. 3-4 Určení vyzařovacího úhlu optiky dle standardu úhlu pole [39]</i>	34
<i>Obr. 4-1 Schéma referenčního standardu LED s teplotní a proudovou stabilizací [20]</i>	36
<i>Obr. 4-2 Znázornění mechanické (geometrické) a optické osy LED [20]</i>	36
<i>Obr. 4-3 Znázornění CIE standardů typu A a typu B pro měření průměrné svítivosti LED [20]</i> ..	37
<i>Obr. 4-4 Částečný světelný tok LED [20]</i>	38
<i>Obr. 5-1 Navržená sestava goniofotometru pro měření křivek svítivosti LED s optikami</i>	39
<i>Obr. 5-2 Upínací systém pro LED</i>	40
<i>Obr. 5-3 Organizace pracoviště pro měření LED s optickými prvky</i>	41
<i>Obr. 5-4 Spektrální kalibrační křivka zjištěná v programu Avasoft</i>	43
<i>Obr. 5-5 Instalovaný optický modul pomocí šroubů na čipu LED</i>	45
<i>Obr. 7-1 Princip TIR optického modulu (a) a reflektoru (b); modrý paprsek je odražený nebo lomený, oranžový paprsek je přímý [44]</i>	58
<i>Obr. 7-2 Volba nejvhodnější kombinace optického prvku a LED</i>	60
<i>Obr. 7-3 Klasifikace podle činitele tvaru křivky (vlevo) a podle BZ křivek (vpravo) [32]</i>	62

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1 Označení měřených vzorků LED.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5-2 Označení a názvy měřených vzorků optických prvků.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5-3 Průměrované poloroviny</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-4 Výpočet celkového světelného toku.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-5 Koeficienty osové symetrie pro jednotlivé poloroviny</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5-6 Výpočet celkového světelného toku s uvažováním korekce osové symetrie</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 5-7 Přepočet hodnot svítivosti na světelný tok 1000 lm</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6-1 Přehled naměřených teplot chromatičností (CT) a udávaných výrobcem (LED CREE jsou CT od výrobce, LED LAB jsou naměřená v laboratoři).....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7-1 Rozdělení svítidel podle rozložení světelného toku [48].....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 7-2 Rozdělení svítidel podle činitele tvaru křivky svítivosti [48]</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 7-3 Klasifikace svítidel podle BZ křivek [48]</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 7-4 Klasifikace uličních svítidel podle tvaru fotometrické plochy v podélném směru [32] ...</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 7-5 Klasifikace uličních svítidel podle tvaru fotometrické plochy v příčném směru [32]</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 7-6 Klasifikace optických prvků podle literatury v [32]</i>	<i>64</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_l	Rozměr místnosti
a	Rozměr parabolického reflektoru od vlastní osy
b	Rozměr místnosti
C1, C2	Clonky
CIE	International Commission on Illumination
CRI, R_a	Color Rendering Index
ČSN	České technické normy
CT	Teplota chromatičnosti
$C-\gamma$	Systém fotometrických rovin
D	Průměr integrátoru
D_{min}	Nejmenší vzdálenost detektoru
E	Osvětlenost
E_N	Normálová osvětlenost
$E_{P,HR}$	Průměrná hodnota horizontálního osvětlení
$E_{max,HR}$	Maximální hodnota horizontálního osvětlení
$E_{min,HR}$	Minimální hodnota horizontálního osvětlení
Ex	Osvětlenost při rozsvíceném měřeném zdroji a se zhasnutým korekčním zdrojem
E_{kN}	Osvětlenost při zhasnutém normálovém zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji
E_{kx}	Osvětlenost při zhasnutém měřeném a korekčním zdroji
EULUMDAT	Datový formát používaný pro specifikaci fotometrických dat zejména svítivosti v prostoru
EZU	Elektrotechnický zkušební ústav
F	Fotočlánek
FWHM	Full Width Half Maximum
f	Vzdálenost od počátku parabolického reflektoru k ohnisku
$f(\gamma)$	Charakteristická funkce svítivosti v úhlech γ
h	Výška svítidla nad srovnávací rovinou
I	Svítivost
I_0	Svítivost ve vztažném směru (v optické ose) obvykle kolmém na hlavní vyzařovací plochu svítidla
I_γ	Svítivost v úhlu γ

I_f	Proud generovaný fotočlánkem
$I_{(i),stř}$	Střední svítivost elementu i
$I_{(i,i+1),stř}$	Střední svítivost elementu zonálního pásu
IESNA (IES)	Illuminating Engineering Society of North America; datový formát specifikovaný v IESNA LM-63
ISO	International Organization for Standardization
IR	Infrared; infračervené záření
I_K	Svítivost při vzdálenosti r_K
I_M	Svítivost naměřená při r_M
k	Činitel místnosti
k_1	Korekční koeficient
k_2	Koeficient pro výpočet cd/1000 lm
k_i	Konstanta integračního fotometru
KIF	Kulový integrační fotometr
LED	Lighting Emitted Doide
M_z	Měrný výkon
n	Počet bodů sítě srovnávací roviny
n_m	Počet měření
p	Kolorimetrická čistota
P_I	Elektrický příkon LED
r	Vzdálenost světelného zdroje od osvětlované plochy
r_o	Rovnoměrnost osvětlení
r_K	Vzdálenost detektoru a světelného zdroje odpovídající normě
r_M	Vzdálenost detektoru a světelného zdroje použitá při měření
S	Plocha
s	Průměr světelného zdroje
SI	Le Système International d'Unités (Soustava jednotek fyzikálních veličin)
TIR	Total Internal Reflection
UV-VIS	Ultraviolet-Visible
UV	Ultraviolet; ultrafialové spektrum
x	Úhel kužele světla
XT-E, XP-E, XT-E	Označení LED použitých pro hodnocení optických prvků
Z	Světelný zdroj

α, γ	Polární systém souřadnic; úhel roviny C; úhel kulového vrchlíku (α)
β	Úhel mezi paprskem a normálou plochy
ϕ	Světelný tok
$\phi(r)$	Světelný tok dopadající na plochu detektoru
$\phi(e)$	Světelný tok v prostoru 4π (vypočítaný z jednoho měření)
ϕ_{sv}	Světelný tok LED nebo soustavy LED a optického prvku
$\phi_{z,1000}$	Světelný tok 1000 lm
ϕ_{opt}	Světelný tok optického prvku
ϕ_{zd}	Světelný tok zdroje
ϕ_x	Měřený světelný tok
ϕ_N	Znamý světelný tok v normále
ϕ_c	Celkový světelný tok
$\phi_{LED, x}$	Částečný světelný tok
η_{sv}	Účinnost optického prvku
η_{el}	Účinnost přeměny elektrické energie na světlo
η_{opt}	Účinnost optického prvku
ρ	Integrální činitel odrazu
π	Ludolfovo číslo
λ	Vlnová délka
Ω	Prostorový úhel

1 ÚVOD

Slunce je denním přirozeným zdrojem světla na planetě Zemi, avšak průmyslový rozvoj si vyžádal vývoj uměle vytvořeného osvětlení. Důležitá byla aplikace umělých světelných zdrojů v průmyslu. Investoři požadovali vyšší výnosy a pracovní efektivitu. To se projevilo prodloužením pracovní doby a zavedením vícesměnného provozu. Práce se většinou provozovaly v uzavřených prostorech s okny, ale osvětlení v místnostech se měnilo dle aktuální pozice Slunce. Zde bylo potřeba zavést umělé osvětlení i během dne.

V současnosti existuje nespočet druhů světelných zdrojů: klasické Edisonovy žárovky, zářivky, výbojky, LED („Lighting Emitted Diode“) aj. Ve zkratce můžeme říci, že je snaha vyrábět světelné zdroje s maximální účinností přeměny elektrické energie na světlo při zachování světelné kvality.

V následujícím textu si popíšeme základní fotometrické veličiny, které jsou důležité pro charakteristiku LED. Ta se liší od ostatních světelných zdrojů a je potřeba změnit přístup k měření, aby byla zachována přesnost a kvalita měření. Proto prostudujeme postupy a doporučení pro měření ze směrnic.

Kromě světelných zdrojů je potřeba vzít v úvahu i optické prvky, kterými definujeme, kam bude směřovat světelný tok. Dalo by se říci, že je to primární úkol optického prvku. Výrobci optické prvky charakterizují účinností, vyzařovacím úhlem a výškou křivky svítivosti. To jsou základní parametry pro návrh světelných soustav. Podívejme se ale i na barevné vlastnosti světla. Jaký bude mít vliv optický prvek na světelné zdroje s různou teplotou chromatičnosti? To se pokusíme zodpovědět v této práci.

1.1 Cíle práce

Prvním úkolem je zhotovení literární rešerše na téma hodnocení optických prvků pro LED. Dále bude provedeno laboratorní měření jednotlivých kombinací LED s optickými prvky. Jelikož v laboratoři není dostupný vhodný goniofotometr pro měření LED, bude nutné provést vlastní návrh a vyhotovení.

Měření optických prvků bude vyhodnoceno se zaměřením na účinnost, úpravu světelného toku (křivky svítivosti) a barevné vlastnosti světla (teplota chromatičnosti, spektrální charakteristiky). Na základě těchto výsledků bude vytvořeno doporučené použití pro jednotlivé kombinace.

2 FOTOMETRICKÉ VELIČINY

Veličiny používané ve světelné technice můžeme rozdělit na:

- fotometrické,
- radiometrické.

Světelný zdroj přenáší do prostoru zářivou energii. Podíl zářivé energie procházející plochou za daný čas se nazývá zářivý tok. Jednotkou je watt. Jakmile se jedná o zářivou energii nebo o veličiny související a obsahující jednotku watt, jde o veličiny radiometrické. Při měření je potřeba uvažovat celé spektrum.

Z celkové zářivé energie se však pro zrakový vjem uplatňuje pouze část, světelná energie, přenášená viditelným zářením, světlem. Proto zavádíme fotometrické veličiny a příslušné jednotky. Fotometrické veličiny jsou:

- světelný tok,
- prostorový úhel,
- svítivost,
- osvětlenost,
- jas,
- světlení.

2.1 Osvětlenost

Osvětlenost nebo také intenzita osvětlení je odvozená fotometrická veličina, která je v praxi nejsledovanější fotometrickou veličinou. Představuje podíl světelného toku ϕ dopadajícího na plochu S . Jednotkou osvětlenosti je lux (lx) a vypočítáme ji podle vztahu:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{lx; lm, m}^2), \quad (2.1)$$

kde E je osvětlenost (lx),

$d\phi$ je element světelného toku (lm),

dS je element plochy, na kterou dopadá světelný tok (m^2). [6][7][8]

Osvětlenost můžeme vyjádřit pomocí svítivosti, ale za předpokladu, že světelný zdroj je bodový. V praxi toho docílíme stěží, proto považujeme za bodový světelný zdroj takový, který je dostatečně vzdálen od osvětlované plochy. Norma ČSN EN 13032-1 definuje tuto minimální vzdálenost jako pětinasobek maximálního rozměru svítící části svítidla (pokud měříme světelný zdroj bez svítidla, uvažujeme rozměr svítící části zdroje). Intenzita osvětlení E klesá se čtvercem vzdálenosti a popisuje ji tzv. čtvercový zákon:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (\text{lx; cd, m}), \quad (2.2)$$

kde I je svítivost zdroje (cd),

r je vzdálenost světelného zdroje od osvětlované plochy (m). [8]

Pokud svírá paprsek světla s rovinou plochy úhel β , můžeme osvětlenost určit podle tzv. kosinového zákona:

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \beta \quad (\text{lx; cd, m, -}), \quad (2.3)$$

kde β je úhel svírající dopadající paprsek s normálou plochy ($^\circ$). [8]

Podle rovnice 2.2 je zřejmé, že intenzita osvětlení E klesá v daném bodě s rostoucí vzdáleností r . Dále je osvětlenost přímo úměrná hodnotě cosinus úhlu β a se vzrůstajícím úhlem β osvětlenost klesá. V případě, že bude úhel $\beta = 0^\circ$, pak hodnota $\cos 0^\circ = 1$ bude maximální. Světelný paprsek bude při $\cos 0^\circ$ v normále a pak hovoříme o tzv. normálové osvětlenosti E_N . [8]

Dále můžeme rozlišovat druh osvětlení podle rovin:

- **horizontální osvětlenost** na vodorovné rovině – výpočtová (měřená) rovina se umísťuje na úroveň podlahy (země) nebo do pracovního místa (stůl), kde se používá zraku
- **vertikální osvětlenost** na svislé rovině – školní tabule, nástěnky, prodejní pulty, posuzování osvětlení křižovatky
- **poloválcová (semicylindrická) osvětlenost** – charakter osvětlení na polokulovém plášti, tj. např. kvalita osvětlení tváře
- **polokulová (hemisférická) osvětlenost** – charakter osvětlení na polokouli, hodnocení náměstí, parků. [7]

Horizontální a vertikální osvětlenosti se užívá v interiérovém i exteriérovém prostředí, naopak půlválcová a polokulová osvětlenost se využívá ve venkovním osvětlení. [7]

2.1.1 Měření osvětlenosti

Osvětlenost ve vnitřních prostorech se měří pro ověření, splnění podmínky a hodnoty osvětlenosti podle projektu, zda jsou hodnoty osvětlenosti v souladu s platnými normami a pro porovnání různých řešení z hlediska hospodárnosti, při dosažení podmínek zrakové pohody. [6]

Měření můžeme rozdělit na:

- přesné (výzkumné účely, náročné vnitřní prostory),
- provozní (ověřování navržených podmínek a jejich dodržování),
- orientační (ověření základních podmínek zrakové pohody). [6]

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, k měření intenzity osvětlení se užívá přístroje zvaného luxmetr. Na Obr. 2-1 je fotografie luxmetru PRC Krochmann Radiolux 111 s laboratorním fotočlánkem v třídě A, používaný v laboratoři světelné techniky na VUT FEKT UEEN v Brně. Skládá se z měřicího a vyhodnocovacího přístroje a kosinového korekčního nástavce. Za kvalitní luxmetr považujeme přístroj, jehož spektrální citlivost odpovídá spektrální citlivosti oka. Fotodetektor luxmetru je opatřen kosinovým nástavcem eliminujícím směrovou chybu. [11]



Obr. 2-1 Luxmetr PRC Krochmann Radiolux 111 [11]

Měření osvětlenosti vychází z norem ČSN 36 0011-1 Měření osvětlení a ČSN 36 0011-3 Měření umělého osvětlení. Umělé osvětlení musí být měřeno v temném prostředí. Osvětlenost se měří v měřicích bodech, rozmístěných v pravidelné síti, v celém prostoru nebo v jeho funkčně vymezených částech (pracovní místa) a na vodorovné srovnávací rovině o výšce 0,85 m nad podlahou. [5][6]

Nejmenší počet bodů sítě se vypočítá ze vztahu:

$$n = \frac{1}{k} = \frac{a_1 \cdot b}{5 \cdot h \cdot (a_1 + b)} \quad (-; -; \text{m}, \text{m}), \quad (2.4)$$

kde a_1, b jsou rozměry měřené místnosti (m),

h je výška svítidla nad srovnávací rovinou (m),

k je činitel místnosti (-). [5]

Při tvorbě bodů je třeba zohlednit polohu svítidla, aby se pokryly místa s největší i nejmenší intenzitou osvětlení. [5]

Měření osvětlení se hodnotí podle:

- průměrné hodnoty horizontálního osvětlení (je to aritmetický průměr provedených měření):

$$E_{P,HR} = \frac{\sum_n E_{P,HR,n}}{n_m} \quad (\text{lx}; \text{lx}, -), \quad (2.5)$$

kde n_m je celkový počet měření,

- maximální hodnoty intenzity osvětlení:

$$E_{\max,HR} \quad (\text{lx}), \quad (2.6)$$

- minimální hodnoty intenzity osvětlení:

$$E_{\min,HR} \quad (\text{lx}), \quad (2.7)$$

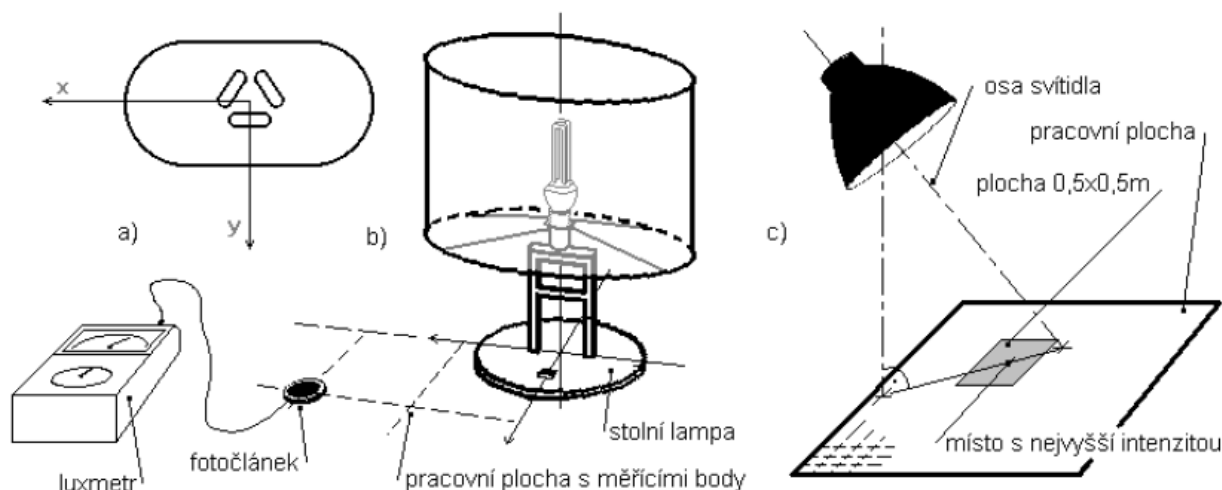
- rovnoměrností osvětlení, což je poměr minimální intenzity osvětlení a průměrné intenzity osvětlení. [5]

$$r_o = \frac{E_{\min,HR}}{E_{P,HR}} \quad (-; lx, lx), \quad (2.8)$$

Rovnoměrnost osvětlení musí být dle normy nejméně pro:

- trvalý pobyt $r = 0,65$ (1:1,5),
- krátkodobý pobyt $r = 0,4$ (1:2,5),
- občasný pobyt $r = 0,1$ (1:10). [5]

Příklad takového měření je zobrazen na následujícím obrázku *Obr. 2-2*. Nejprve se určí orientace světelného zdroje v systému svítidla (*Obr. 2-2a*), tj. určíme osy pracovní plochy s měřicími body. Dále se určí vzájemná poloha svítidla, zdroje a souřadnicového systému pracovní plochy (*Obr. 2-2b*). Pokud osa svítidla není kolmá na pracovní plochu, omezí se prostor pro měření a zpracování hodnot na plochu 0,5 m x 0,5 m se středem v bodě s nejvyšší intenzitou osvětlení (*Obr. 2-2c*). [5]



Obr. 2-2 Ilustrace postupu měření intenzity osvětlení [5]

Výsledky měření intenzity osvětlení se uvádí v tabulkách nebo grafech, které jsou součástí protokolu o měření. Příkladem takového zobrazení jsou izoluxní křivky.

2.1.2 Měření osvětlenosti od malých světelných zdrojů

Pro měření osvětlení od malých světelných zdrojů se mimo jiné používá světlovodné vlákno s kosinovým korekčním nástavcem, který slouží jako senzor hodnoty osvětlení. V moderních laboratořích se provádí měření za pomoci spektrometru, který je připojen k PC a ovládán programem. Díky software v PC můžeme provádět různá nastavení, kalibraci, a také zobrazovat naměřená data. Pomocí zadané a nastavené fotometrické vzdálenosti je pak možno vypočítat i hodnotu svítivosti podle inverzního čtvercového zákona. [12]

Protože přenos signálu světlovodným vláknem není bezztrátový a určitou účinnost přenosu má i kosinový nástavec, je nutné celou měřicí soustavu před měřením kalibrovat. Kalibrace se provádí pomocí známého kalibračního zdroje světla, jejíž přesná data jsou přiložena k programu. Před každým měřením po načtení kalibračních dat je vhodné provést kalibraci tmy tím, že

fotodetektor (kosinový nástavec) zatemníme a provedeme kalibraci tmy. Přístroj totiž detekuje i neviditelný rozsah spektra a mohly by nastat vysoké fluktuace od teplotního šumu, které by ovlivňovaly přesnost měření. Aby toto bylo eliminováno, je vhodné mít aktuální data o teplotním šumu v době probíhajícího měření. [12]

V dalším kroku upevníme světelný zdroj do goniofotometru tak, aby zdroj byl ve stejné ose jako měřicí prvek a nezapomeneme nastavit fotometrickou vzdálenost. [12]

2.2 Svítivost

Svítivost se značí písmenem I a je to fotometrická veličina. Její jednotkou je 1 kandela, která je základní jednotkou soustavy SI. Od roku 1979 je kandela definována jako svítivost zdroje, jenž vyzařuje pod určitým úhlem monochromatické záření s intenzitou $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ o frekvenci $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$. Svítivost popisuje distribuci světelného záření do prostoru. Udává, kolik světelného toku vyzáří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru a určíme ji podle vztahu 2.9 [8]

$$I_{\gamma} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \text{ (cd; lm, sr),} \quad (2.9)$$

kde I_{γ} je svítivost v úhlu γ ,

$d\phi$ je element světelného toku,

$d\Omega$ je element prostorového úhlu.

Svítivost je tedy vektor, který má velikost a směr. Směr je určen úhlem γ . Spojením všech koncových bodů vektorů svítivosti od bodového zdroje světla, dostaneme tzv. fotometrickou plochu svítivosti. Ta vyjadřuje směrové charakteristiky vyzařování světelného zdroje. Pro snadnější popis vyzařovacích charakteristik definujeme pouze vybrané řezy touto plochou pomocí řezných rovin. Nejčastějším systémem řezných rovin je systém rovin C , někdy označovan také jako C - γ . [9]

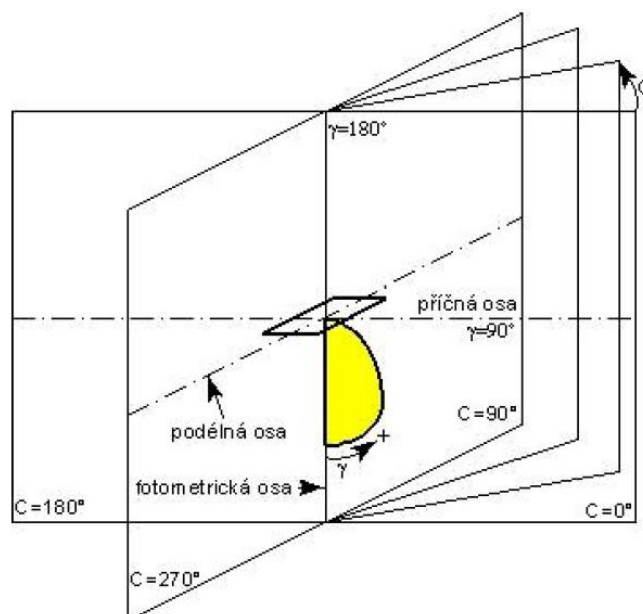
Světelné zdroje se výhradně používají spolu se svítidly. Ty mají za úkol distribuovat světelný tok do požadovaného prostorového úhlu pro dosažení optimální osvětlenosti. [5]

2.2.1 Systém fotometrických řezných rovin

Norma ČSN EN 13032-1 definuje souřadnicový systém pro popis rozložení svítivosti, který umožňuje definovat směr, ve kterém bylo měření svítivosti provedeno. V současné době se používá sférický souřadnicový systém, jehož počátek je totožný s fotometrickým středem svítidla. [15]

Dále se norma zabývá soustavami fotometrických rovin. Organizace CIE zavedla soustavy A -, B - a C -rovin. Norma ČSN EN 13032-1 se zabývá rovinami B a C . Soustava B -rovin se používá pro popis např. světlometů. Jelikož soustava C -rovin se považuje za doporučenou standardní soustavu, popíšeme si ji podrobněji. [15]

Soustava C -rovin je svazek rovin, jejichž průsečnice (osa svazku) je svislá přímka procházející fotometrickým středem svítidla. Ukázka soustavy fotometrických polorovin C - γ je na Obr. 2-3. Označení C_0 a C_{90} jsou poloroviny o úhlech 0° a 90° v systému rovin C . Úhel γ slouží pro vyjádření směru množství svítivosti v dané polorovině. Jednotlivé svítivosti v úhlech příslušné poloroviny měříme na goniofotometrech. Pro dodržení fotometrického zákona musí být rozměry měřeného svítidla zanedbatelné oproti vzdálenosti detektoru od kontrolního bodu (lokalizace měřeného svítidla). [15][5]



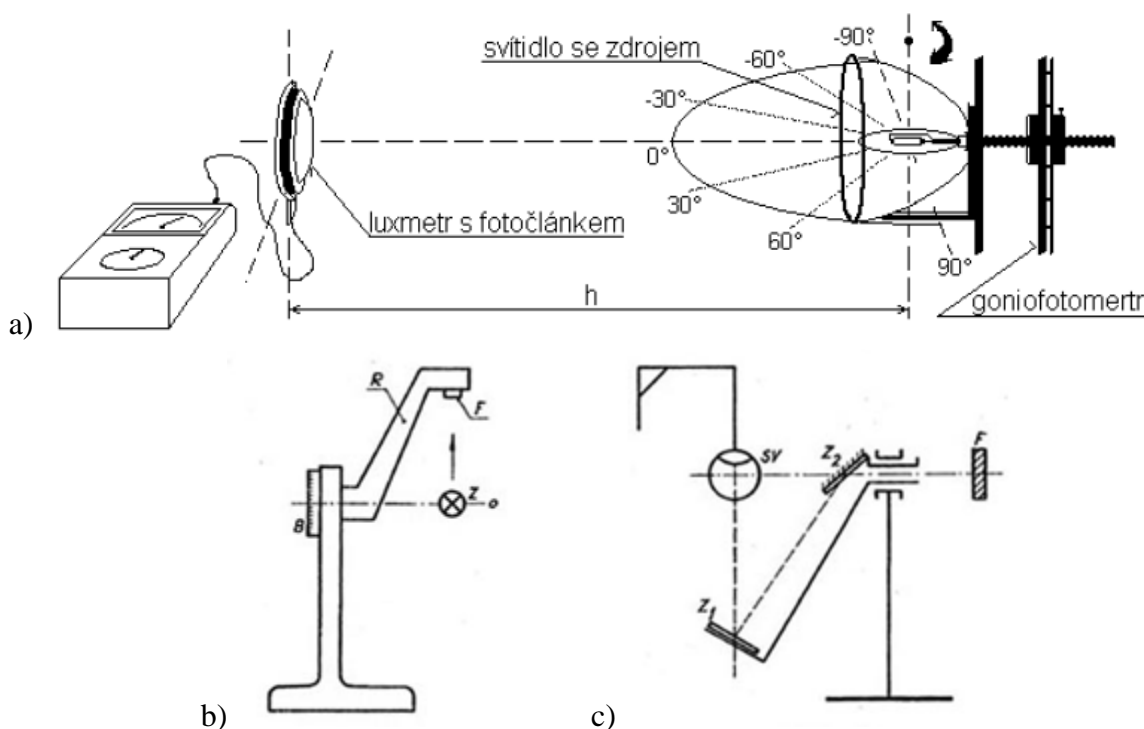
Obr. 2-3 Soustava fotometrických polorovin C-γ [48]

2.2.2 Goniofotometr

Goniofotometr je mechanické zařízení, pomocí něhož lze měřit svítivost v různých polorovinách a pod různými úhly viz kap. 2.2.1. Goniofotometr je většinou součástí fotometrické lavice.

Podle konstrukce lze goniofotometry dělit:

- s otočným zdrojem a pevným fotometrem Obr. 2-4a
- s pevným zdrojem a otočným fotometrem Obr. 2-4b
- s rotujícím zrcadlem Obr. 2-4c. [14]



Obr. 2-4 Ukázka goniofotometru a) s otočným zdrojem a pevným fotometrem, b) s pevným zdrojem a otočným fotometrem, c) s rotujícím zrcadlem [5][14]

Princip goniofotometru s otočným zdrojem a pevným fotometrem jasně zobrazuje Obr. 2-4a. Luxmetr s fotočlánkem je v ose se středem svítidla se zdrojem, který je upnut v goniofotometru. Velmi vhodné je na tomto typu goniofotometru měřit zářivková tělesa, která jsou pro ostatní typy goniofotometrů nevhodná. Nevýhodou tohoto modelu je upínání v horizontální poloze. Některé světelné zdroje mají jinou pracovní polohu, také jejich svítivost může být závislá na poloze. Jsou to například světelné zdroje výbojové a některé zářivky. Z tohoto důvodu může dojít ke zkreslení naměřených výsledků. Ideálně by bylo vhodné měřit každé svítidlo se světelným zdrojem ve své pracovní poloze. To ovšem není vždy v laboratoři reálné z prostorových důvodů. Jedná se však o univerzální zařízení pro měření světelných zdrojů se svítidly. [16]

U goniofotometru s rotujícím zrcadlem je zrcadlo po celé své oběžné dráze natáčeno tak, aby odrazilo světlo do snímače. Výhodou je měření velkých i malých svítidel a to na velké vzdálenosti. Nevýhodou u tohoto typu je velká prostorová náročnost, neboť pro splnění zanedbatelné chybovosti čtvercového zákona je nutné mít dvojnásobné rozměrové prostory oproti goniofotometru s otočným zdrojem. S větším prostorem také souvisí vyšší nároky na clonění, aby nedocházelo k ovlivnění měření odrazy světla z okolí, případně jiného světelného zdroje v laboratoři. Značné nároky jsou také kladeny na čistotu zrcadel. [16]

Goniofotometr s pevným zdrojem a otočným snímačem (fotometrem) je velmi podobný goniofotometru s rotujícím zrcadlem. Rozdíl je pouze v tom, že místo zrcadla je na otočném rameni umístěn přímo snímač. [16]

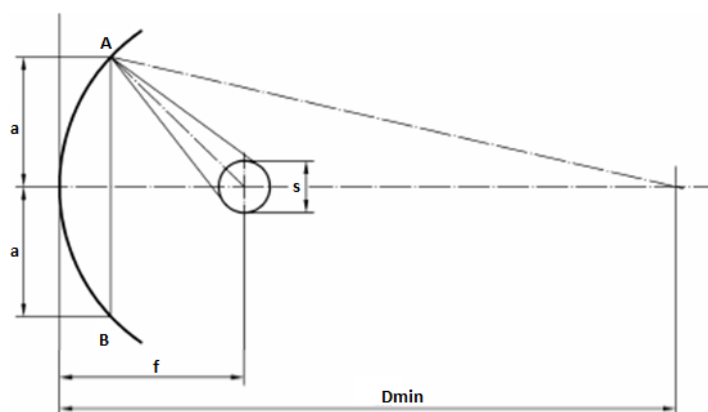
2.2.3 Podmínky užití čtvercového zákona

Při měření svítivosti, která vychází ze zákona čtverce vzdálenosti, musí být fotometrická vzdálenost nejméně pětinašobkem maximálního rozměru svítící části svítidla. Bod v této

vzdálenosti se nazývá bod „křížení paprsků“ a je to místo, ve kterém se optický systém jeví jako rovnoměrně zářící. Zákon čtverce vzdálenosti lze použít ve vzdálenostech větších, než je vzdálenost tohoto bodu. [15]

U svítidel s rozložením svítivosti, které se výrazně odchyluje od kosinového průběhu (například světlomety), je třeba určit nejmenší vzdálenost bodu „křížení paprsků“ D_{\min} z následujícího vztahu podle Obr. 2-4: [15]

$$D_{\min} = \frac{a^2}{4f} \left(1 + \frac{2a}{s} \right) + \frac{2af}{s} \quad (\text{m}; \text{m}^2, \text{m}, \text{m}, \text{m}, \text{m}^2, \text{m}, \text{m}). \quad (2.10)$$



Obr. 2-5 Stanovení minimální fotometrické vzdálenosti [15]

2.2.4 Měření křivek svítivosti

Světelné zdroje samotné v drtivé většině případů nevyhovují pro použití v osvětlovacích systémech, protože mají pro dané účely nevhodné rozdělení světelného toku. [5]

Křivky svítivosti svítidel jsou základem pro návrh osvětlení osvětlovací soustavy. Křivky svítivosti se využívá jak při zjednodušených přibližných výpočtech, tak především ve výpočetních programech. [5]

Každou křivku svítivosti, kterou získáme vynesemím vektorů svítivosti dané měřené fotometrické roviny, můžeme nahradit analytickou funkcí závislosti svítivosti na úhlu dle vztahu: [5]

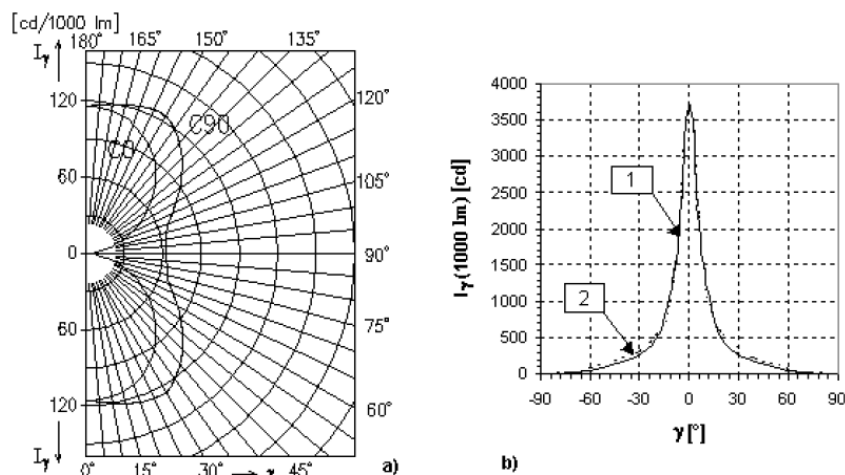
$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad (\text{cd}; \text{cd}, -), \quad (2.11)$$

kde I_{γ} je svítivost pod úhlem γ od vztažného směru (I_0),
 I_0 je svítivost ve vztažném směru (v optické ose) obvykle kolmém na hlavní vyzařovací plochu svítidla,
 $f(\gamma)$ je charakteristická funkce svítivosti. [5]

Charakteristická funkce svítivosti je analytická aproximační funkce popisující změřenou křivku svítivosti. Nejčastěji se využívají funkce $\cos^n \gamma$, $\sin \gamma$ a $\sin \gamma \cdot \cos^n \gamma$ (kde $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) a zejména pak různé lineární kombinace uvedených funkcí. [5]

Ze změřených hodnot vektorů I_γ dané fotometrické roviny sestojíme diagram. Grafický diagram může být v polárních (ortogonálních) souřadnicích (Obr. 2-6a) nebo může být zakreslen v kartézském souřadnicovém systému (Obr. 2-6b). Kartézské souřadnice se používají pro svítidla s rotačně symetrickou plochou. [5]

Aby udávané křivky svítivosti byly nezávislé na světelném toku použitého zdroje svítidla, přepočítávají se diagramy na světelný tok 1000 lm. [5]



Obr. 2-6 a) Křivky svítivosti svítidla v rovinách C0 a C90 v ortogonálních souřadnicích
b) 1. křivka svítivosti v kartézském souřadnicovém systému; 2. a její aproximace [5]

2.3 Světelný tok

Je odvozená fotometrická jednotka mezinárodní soustavy SI. Světelný tok se značí symbolem Φ a jednotkou je lumen (lm). O tuto jednotku se zasloužil francouzský fyzik André Eugene Blondel (1863 - 1938), kdy v roce 1894 předložil návrh na přijetí. Schválena byla o dva roky později na jednání International Electrical Congress. [1]

Světelný tok můžeme určit dvěma metodami, a to metodou graficko početní z křivek svítivosti nebo jednodušší metodou za použití světelného integrátoru. V následujících kapitolách si tyto metody přiblížíme podrobněji.

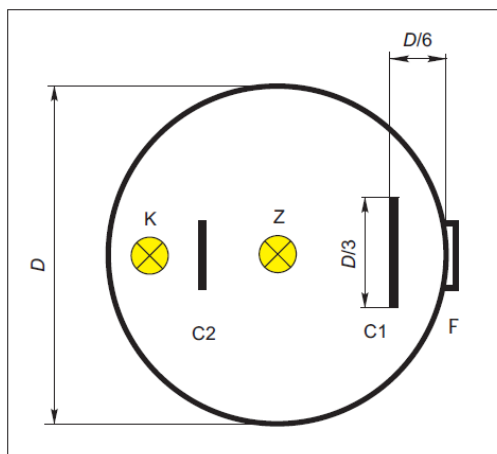
2.3.1 Měření světelného toku pomocí integrátoru s fotočlánkem

Abychom zjistili světelný tok zdroje, musíme změřit svítivost ve všech směrech vyzařování, který je kolem světelného zdroje nehomogenní. V praxi by takové měření bylo velmi zdlouhavé a ne zcela přesné. Proto se zavedl integrační fotometr.

Světelný integrátor může mít tvar kvádra nebo krychle, každopádně pro kvalitnější distribuci elementárního světelného toku se používá tvar koule. Ta je dutá a zevnitř je nanesen speciální rozptylový nátěr, který má vysoký činitel odrazu (v mezích 0,75 až 0,85). Je požadavek, aby nátěr byl barevně neselektivní. [2]

Svítivost je přímo úměrná elementu světelného toku a nepřímo úměrná elementu prostorového úhlu. Pokud sečteme všechny elementy světelného toku přes všechny směry vyzařování, pak získáme celkový světelný tok. [3]

Na Obr. 2-7 je graficky zobrazen náčrt uspořádání kulového integračního fotometru (KIF). Na jedné straně koule je otvor s fotočlánkem F, který je zastíněn clonkou C1, aby nebyl ozařován přímo světelným zdrojem Z. Clonka C1 je ve vzdálenosti $D/6$ od otvoru k fotočlánku a je kruhového tvaru. Pokud světelný zdroj Z zavěšený ve středu koule rozsvítíme, budou vznikat uvnitř KIF mnohonásobné odrazy. Cílem je vytvořit ideální difuzní odražeč blížíící se vlastnostmi Lambertovu zářiči. [2]



Obr. 2-7 Náčrt uspořádání integračního kulového fotometru [2]

Nyní zavedeme tzv. integrální činitel odrazu ρ , což je odražená složka celkového světelného toku Φ_c , a je rovna:

$$\Phi = \rho\Phi_c + \rho^2\Phi_c + \rho^3\Phi_c + \dots + \rho^n\Phi_c = \frac{\rho}{1-\rho}\Phi_c \quad (2.12)$$

Na povrchu integrátoru πD^2 o průměru D je pak výsledná osvětlenost konstantní a je přímo úměrná celkovému světelnému toku:

$$E = \frac{\Phi}{\pi D^2} = \frac{\rho}{\pi D^2(1-\rho)}\Phi_c = k_i \cdot \Phi_c \text{ (lx; lm, m; m, lm; lm)}, \quad (2.13)$$

kde Φ_c je celkový světelný tok v prostorovém úhlu 4π , k_i je konstanta integračního fotometru.

Velikost proudu generovaného fotočlánkem je pak také úměrná velikosti světelného toku:

$$I_f = k_i \cdot \Phi_c \text{ (A; lx/lm, lm)}. \quad (2.14)$$

Dále si popíšeme postup měření s korekčním zdrojem. Do středu KIF umístíme světelný normál, rozsvítíme ho a při zhasnutém korekčním zdroji odečteme osvětlenost E_N . Druhé měření provedeme při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji a odečteme osvětlenost E_{kN} . Třetí měření provedeme se zhasnutým měřeným světelným zdrojem, ale se zhasnutým korekčním zdrojem. Pak odečteme osvětlenost E_{kx} . Poslední měření provedeme s rozsvíceným měřeným zdrojem a se zhasnutým korekčním zdrojem, se změřenou osvětleností E_x . Pokud známe světelný tok normálu, můžeme určit světelný tok měřeného zdroje, a to následovně: [2][3]

$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x}{E_N} \frac{E_{kN}}{E_{kx}} (\text{lm; lm, lx, lx, lx, lx}). \quad (2.15)$$

2.3.1.1 Měření v praxi

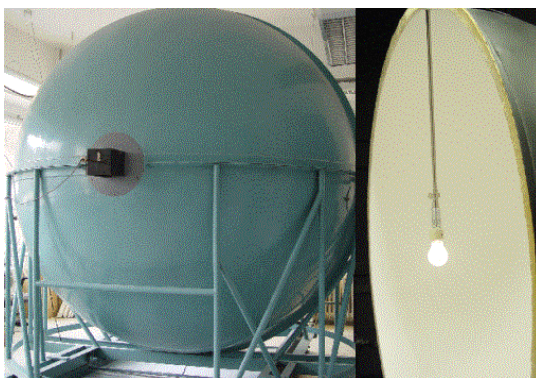
Pokud přijdeme do jakékoliv laboratoře světelných zdrojů, konstanta integračního fotometru k_i bude zapsaná v dokumentaci nebo přímo na KIF. Většinou se udává v převodních jednotkách lm/V. Stačí tedy k fotočlásku připojit multimetr (ampérmetr, voltmetr, v závislosti na normovaném převodu), do KIF umístit světelný zdroj a odečíst hodnotu z měřicího přístroje. Tuto hodnotu vynásobíme převodem a získáme výsledný světelný tok zdroje.

Jestliže budeme zároveň měřit i příkon světelného zdroje, můžeme výsledný světelný tok zdroje vydělit příkonem a získáme měrný výkon. Je to základní údaj charakterizující světelný zdroj.

Světelný zdroj se v drtivé většině případů používá spolu se svítidlem, které směřuje světelný tok do daného prostorového úhlu. Svítidlo obsahuje i plochy, které se přímo nepodílí na distribuci světelného toku a způsobují tím jeho pohlcování. Tuto chybu je nutné korigovat. Proto se zavádí dílčí měření zaměřené na korekci neaktivních částí svítidla [3].

Na Obr. 2-8 je fotografie kulového integrátoru v laboratoři EZU, který má k dispozici zařízení o průměrech od 400 mm do 3000 mm. Na tomto zařízení se realizuje měření typu:

- kalibrace etalonů světelných toků,
- měření světelných toků zdrojů (žárovky, zářivky, výbojky, aj.),
- měření účinnosti svítidel,
- měření vlastností světelně činných materiálů (činitele prostupu, odrazu, rozptylu). [4]

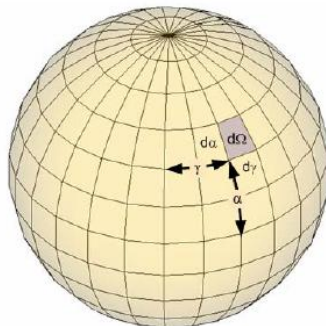


Obr. 2-8 Fotografie kulového integrátoru v laboratoři EZU [4]

2.3.2 Určení světelného toku z křivek svítivosti – metoda zonálních toků

Pokud si představíme bodový zdroj, který vyzařuje světelný tok do všech směrů, můžeme kolem něho nakreslit kouli. Pro lepší srovnání použijeme model Země, globusu, který je zobrazen na obrázku Obr. 2-9. Díky tomuto modelu můžeme vyjádřit celý prostorový úhel 4π kolem světelného zdroje. Povrch koule dále dělíme na rovnoběžky a poledníky. Vzniknou tak elementy prostorového úhlu. Pro polární systém souřadnic α, γ můžeme napsat vztah: [9]

$$d\Omega = \cos \alpha \cdot d\gamma d\alpha \quad (2.16)$$



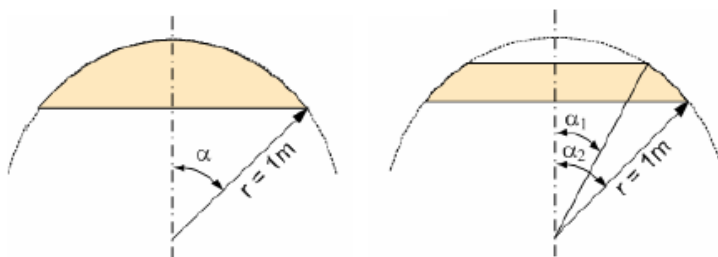
Obr. 2-9 Prostorový úhel v souřadnicích α , γ [9]

Z předchozího vztahu lze odvodit vzorec pro výpočet velikosti elementu prostorového úhlu kulového vrchlíku: [9]

$$d\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (2.17)$$

a vztah pro výpočet velikosti elementu prostorového úhlu kulového pásu podle: [9]

$$d\Omega = 2\pi \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (2.18)$$



Obr. 2-10 Prostorový úhel kulového vrchlíku a kulového pásu [9]

Křivky svítivosti se měří. Budeme tedy znát svítivost ve zvolených vyzařovacích úhlech. Prostorový úhel kulového pásu rozdělíme na jednotlivé elementy o stejné ploše. Je potřeba určit střední svítivost v elementu $I_{(i),stř}$:

$$I_{(i),stř} = \frac{I_{(i+1)} + I_{(i)}}{2} \text{ (cd; cd, cd),} \quad (2.19)$$

kde pro $i = 1, 2, \dots, n$,
 $I_{(i+1)}$ je svítivost pod úhlem $\alpha + 1$,
 I_0 je svítivost pod úhlem α . [5]

V dalším kroku můžeme určit podle vzorce (2.9) světelný tok v jednom elementu plošky ze znalosti prostorového úhlu a střední svítivosti elementu plošky.

Součtem všech elementárních světelných toků získáme celkový světelný tok světelného zdroje. Uvedeme si krátký příklad pro pochopení:

Je zadán světelný zdroj s optickým prvem, jehož symetrie je podle rovin $C0-C180$ a $C90-C270$. Určete celkový světelný tok soustavy z naměřených hodnot svítivosti. Měření proběhlo v polorovinách $C0$ až $C90$ po kroku 15 stupňů a v úhlech $\gamma = (0^\circ - 180^\circ)$.

Určíme střední svítivosti pro úhly γ s uvažováním zadané symetrie:

$$I_{(i),stř} = \frac{I_{C0} + I_{C90} + 2 \cdot (I_{C15} + I_{C30} + I_{C45} + I_{C60} + I_{C75})}{12} \text{ (cd)} \quad (2.20)$$

Vypočítáme prostorové úhly zonálních pásů:

$$\Omega_{i,i+1} = 2\pi \cdot (\cos \gamma_i - \cos \gamma_{(i+1)}) \quad (2.21)$$

a střední svítivosti zonálních pásů:

$$I_{(i,i+1),stř} = \frac{I_{(i)} + I_{(i+1)}}{2} \text{ (cd; cd, cd)} \quad (2.22)$$

Světelný tok zonálním pásem pak bude:

$$\Phi_{i,i+1} = \Omega_{i,i+1} \cdot I_{(i,i+1),stř} \text{ (lm; sr, cd)} \quad (2.23)$$

Celkový světelný tok soustavy získáme součtem všech dílčích zonálních toků. [37]

2.4 Ostatní požadavky na světelné zdroje

2.4.1 Index podání barev

Index podání barev je hodnota, která vyjadřuje věrnost podání barev pro jednotlivé typy světelných zdrojů. Označuje se CRI („Color Rendering Index“) nebo je v některých případech také označován Ra . Hodnota je vyjadřována v procentech, kdy 100 % udává naprosto věrné podání barev při použití referenčního zdroje světla (světlo klasické žárovky pro nižší hodnoty teploty chromatičnosti, denní bílé světlo pro vyšší hodnoty teploty chromatičnosti). U LED světelných zdrojů se hodnota CRI pohybuje nad hranicí 70 % (70 – 90 %). Pro srovnání u kompaktních zářivek se hodnota pohybuje v rozmezí 50 – 90 %. [22]

Na *Obr. 2-11* je zobrazeno ideální spektrum světelného zářiče. Při tomto spektru a stejné intenzitě každé vlnové délky barvy je index barevného podání $CRI (Ra) = 100$.

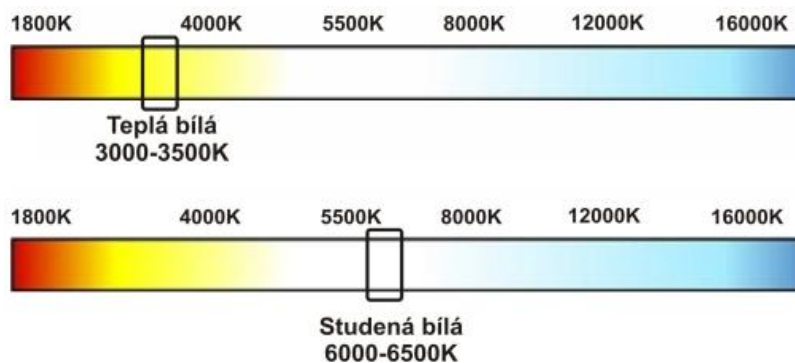


Obr. 2-11 Spektrum ideálního světelného zářiče [24]

2.4.2 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti charakterizuje vnímání a parametry vyzařovaného světla. Udává se v Kelvinech. Tento parametr vyjadřuje barevné vnímání světla, kdy hodnota kolem 2700 K – 3500 K reprezentuje tzv. teplé bílé světlo, které odpovídá světlu vyzařovanému klasickými žárovkami – jasné, mírně nažloutlé světlo. Tento typ světla navozuje domácí atmosféru, pocit útulnosti a příjemné relaxační pocity. Teplota chromatičnosti s hodnotou 4000 K představuje neutrální (studené) bílé světlo, hodnota kolem 5000 K představuje denní bílé světlo (pocitově se blíží světlu za jasného bílého dne), hodnota nad 6500 K reprezentuje studené bílé denní světlo, které je při hodnotách kolem 8000 K vnímáno až jako slabě namodralé. [22]

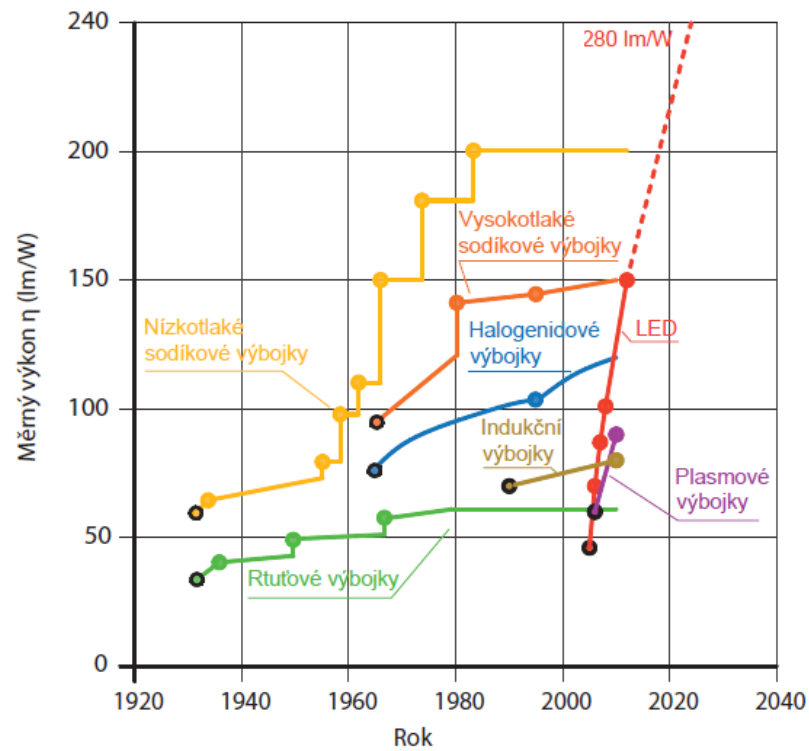
Na Obr. 2-12 je zobrazen pro ukázkou rozsah teplé a studené bílé LED. Teplá bílá má zabarvení do žluta, oproti tomu studená bílá LED má zabarvení jasně bílé a lehce do modra. Pro představu teplá bílá LED se používá především pro osvětlení v obytných prostorech. Jelikož je žlutě zabarvena působí příjemně. Studená bílá LED se hojně používá pro osvětlení průmyslových hal, obchodů a v potravinářském průmyslu. V domácnosti se tato barva doporučuje jen do kuchyně. [23]



Obr. 2-12 Teplota chromatičnosti teplé bílé a studené bílé LED [23]

2.4.3 Měrný výkon

Měrný výkon světelného zdroje je podíl světelného toku a elektrického příkonu. Měrný výkon tedy určuje účinnost světelného zdroje a vyjadřuje se v lumenech na watt (lm/W). [25] Na Obr. 2-13 je zobrazen měrný výkon světelných zdrojů stávajících a měrný výkon odhadovaný v blízké budoucnosti. Jak můžeme vidět na obrázku, LED mají velmi dobrý výhled do budoucnosti a měrný výkon se neustále zvyšuje. Je to dáno především investicemi do vývoje LED.



Obr. 2-13 Vývoj měrných výkonů vybraných světelných zdrojů [26]

3 OPTICKÉ PRVKY PRO LED

3.1 Rozdělení optických prvků

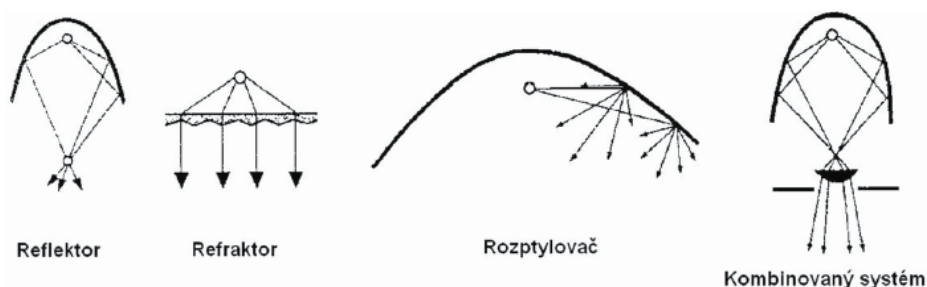
Výkonové LED se většinou vyrábí s vyzařovacím úhlem nad 90° . Příkladem můžou být LED, které budeme měřit v laboratoři, tj. XT-E, XP-E a XP-G s vyzařovacím úhlem nad 115° [33][34][35][36]. Tato distribuce světelného toku není vhodná pro každou aplikaci. Proto se užívá optických členů pro usměrnění světelného toku odrazem nebo lomem světla do požadovaných směrů. V praxi se používají pro změnu křivky svítivosti následující optické členy:

- odrazné členy
 - parabolický reflektor,
- aktivní členy (refraktory)
 - čočka (konvexní, také nazývaná spojka),
 - Fresnelova čočka,
 - speciálně tvarované čočky,
 - difuzor (rozptylovač).

V řadě aplikací se používají soustavy optických členů. Tyto optické prvky se velkou částí podílí na účinnosti celé světelné soustavy, proto se jimi budeme zabývat podrobněji v dalších kapitolách.

3.1.1 Popis optických prvků

Parabolický reflektor (*Obr. 3-1*) usměrňuje aktivní plochou dopadající paprsky do rovnoběžného svazku se svou optickou osou. Světelný zdroj se umísťuje do ohniska reflektoru. Jelikož zdroj není bodový a má své rozměry, bude v praxi umístěn okolo ohniska. Se vzdáleností se pak světelný svazek bude rozšiřovat a zvětší se úhel vyzařování. Na účinnosti se podílí zejména odrazná plocha (materiál, povrchová úprava), kterou můžeme charakterizovat odrazivostí. Špičkové reflektory dosahují účinnosti až 95 %. [8][37]

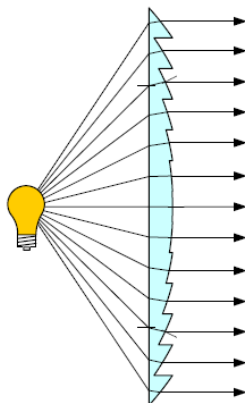


Obr. 3-1 Princip reflektoru, refraktoru, rozptylovače a složeného optického systému [8]

U refraktorů (*Obr. 3-1*) probíhá změna distribuce světelného toku na základě Snellova optického zákona lomu. Do této skupiny refraktorů patří konvexní čočka, která mění rovnoběžný svazek paprsků ve sbíhavý do ohniska. Materiálem je sklo nebo speciální plastové slitiny zaručující vysokou propustnost. [8][37]

Fresnelova čočka (*Obr. 3-2*) je upravená konvexní čočka tak, že jsou odstraněny ty části, které se přímo nepodílí na lomu svazku paprsků. Výhodou je tedy nižší hmotnost a nižší tloušťka. Charakteristickým parametrem ovlivňující účinnost optického prvku je u refraktorů propustnost. [8][37]

Pokud je dopadající paprsek rovnoměrně rozptýlen do všech směrů, jedná se o rozptylovač (*Obr. 3-1*). Vyrábí se z opálového (bílého opálového) skla (tzv. mléčné sklo). Výhodou opálového skla je snížení jasů tak, že světelný zdroj nezpůsobuje oslnění. Nevýhodou jsou velké ztráty. [8][37]



Obr. 3-2 Fresnelova čočka [37]

3.2 Parametry charakterizující optické prvky

V současné době nejsou vydány normy a standardy pro charakterizování optických prvků. K dispozici jsou pouze data od výrobce (dodavatele). Je tedy na místě, aby výrobce objasnil tyto data pro spotřebitele (např. v katalogu, na webu) na pravou míru a nebylo pochyb o významu udávaných parametrů. V následujícím textu si popíšeme často udávané parametry optických prvků výrobci. [37]

3.2.1 Účinnost

Optickou účinnost lze zjistit více způsoby. První možností je použití integrátoru. Postup je takový, že nejprve do integrátoru vložíme čip LED a změříme světelný tok. V dalším kroku instalujeme na čip LED optický prvek a opět změříme světelný tok. Účinnost zjistíme poměrem světelného toku čipu LED s optickým prvkem a světelného toku samostatného čipu LED. Pokud chceme výsledek v procentech, vynásobíme poměr stem. Tato metoda je jednoduchá, velmi rychlá a přesná.

$$\eta_{opt} = \frac{\Phi_{opt}}{\Phi_{zd}} \cdot 100 \text{ (\%; lm, lm, -)} \quad (3.1)$$

Dalším způsobem je využití naměřených křivek svítivosti. Pomocí metody zonálních toků se vypočítá světelný tok. Postup je uvedený v kapitolách 2.3.2 a 5.5.1.2.

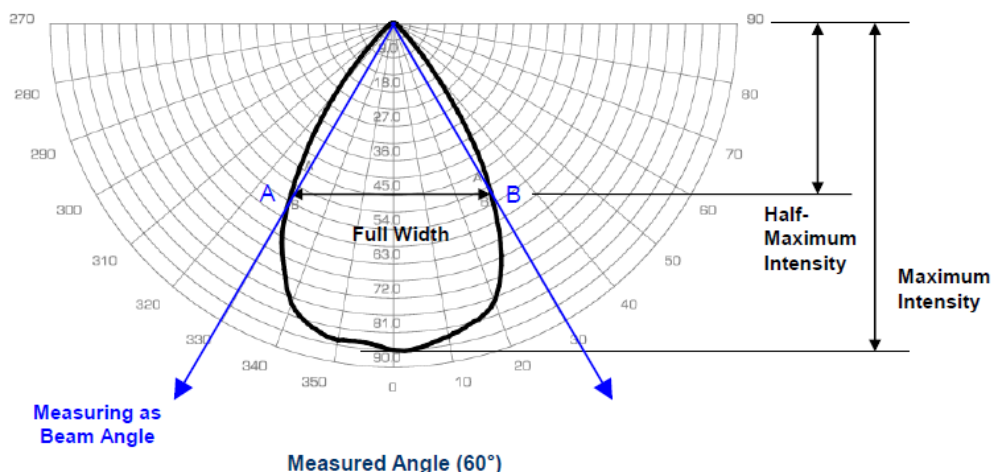
3.2.2 Vyzařovací úhel

V praxi se vyzařovací úhel určuje z polárního diagramu křivek svítivosti. Všeobecně nejrozšířenější jsou dva standardy:

- Plná šířka z poloviny maxima (pozn. autora, přeloženo z angličtiny Full Width at Half Maximum – FWHM)
- Plná šířka z 10 % maxima (pozn. autora, přeloženo z angličtiny Full Width at 10 % Maximum; standard také nazývá úhel pole – Field Angle) [39]

3.2.2.1 Plná šířka z poloviny maxima (FWHM)

Tento standard byl definován pro symetrické optiky s maximální svítivostí ve středu křivky svítivosti. Vyzařovací úhel se určí z polárního diagramu křivky svítivosti, jak je naznačeno na (Obr. 3-3). V diagramu si nejprve zjistíme maximální svítivost popř. svítivost přepočítanou na 1000 lm („Maximum Intensity“). Dále označíme body na křivce svítivosti (v našem případě A a B), které náležejí polovině maximální svítivosti („Half-Maximum Intensity“). Nakonec vedeme spojnici z výchozího bodu do bodů A a B, které představují vyzařovací úhel („Measuring as Beam Angle“). Naměřený úhel jsme odečetli 60° („Measured Angle (60°)“) v případě grafu na Obr. 3-3. [39]



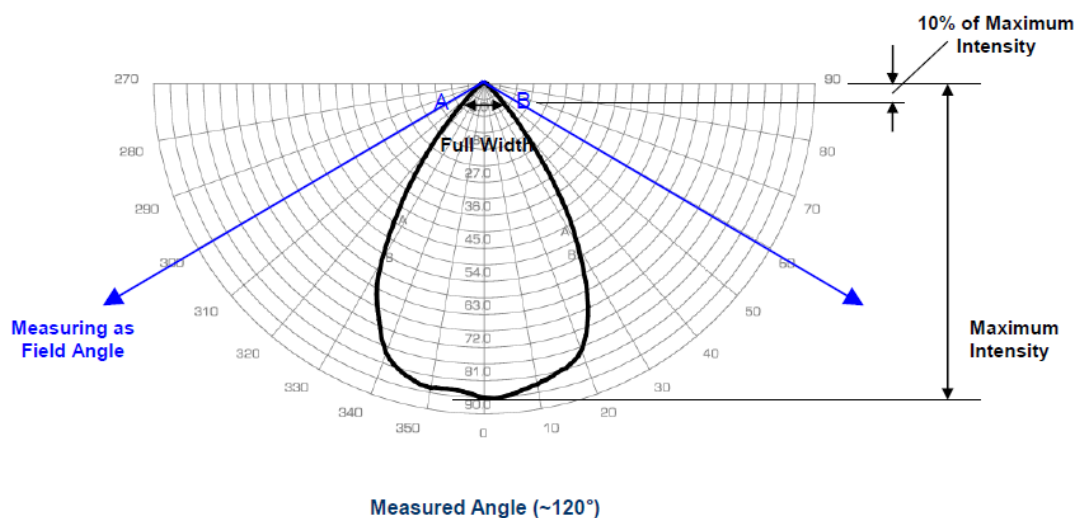
Obr. 3-3 Určení vyzařovacího úhlu optiky dle standardu FWHM [39]

3.2.2.2 Plná šířka z 10 % maxima

Vyzařovací úhel se v případě tohoto standardu nazývá úhel pole. Vyzařovací úhel se opět určí z polárního diagramu křivky svítivosti, jak je naznačeno na (Obr. 3-4). V diagramu si nejprve zjistíme maximální svítivost. Dále označíme body na křivce svítivosti (v našem případě A a B), které náležejí 10 % z maximální svítivosti („10% of Maximum Intensity“). Nakonec vedeme spojnici z výchozího bodu do bodů A a B, které představují úhel pole („Measuring as Field Angle“). Naměřený úhel jsme odečetli 120° („Measured Angle (~120°)“) v případě grafu na Obr. 3-4. [39]

Úhel pole je přibližně 1,5 až 2x větší než u FWHM. Z příkladu na Obr. 3-3 úhlu FWHM 60° odpovídá úhel pole 100°-120° (Obr. 3-4). [39]

Úhel FWHM však nemusí dávat správnou představu o optickém prvku a o jeho křivce svítivosti. Může nastat případ, kdy dvě křivky svítivosti mají stejný úhel FWHM, ale rozdílný úhel pole. [39]



Obr. 3-4 Určení vyzařovacího úhlu optiky dle standardu úhlu pole [39]

3.2.3 Hodnota cd/lm

Velmi důležitým doplňkem předchozích parametrů je hodnota kandela na lumen. Jak již název napovídá, je to naměřená svítivost přepočítaná na 1 lm. Tato hodnota určuje výšku křivky svítivosti. Je tedy vhodná pro porovnávání více optických prvků v jednom grafu. Tento parametr musí být brán v úvahu spolu s ostatními parametry především s křivkou svítivosti, aby nedošlo ke zkreslení představy o optickém prvku. [39]

V praxi se v grafech křivek svítivosti používá měřítko cd/1000 lm. Hodnota cd/lm se používá pro srovnávání v tabulkách.

3.2.4 Archivace naměřených dat

Některé firmy pro zjištění parametrů optických prvků používají simulační programy. Tyto data se mohou lišit od skutečných (měřených na finálním produktu). Pro většinu optických prvků však firmy provádí měření, která jsou dostupná běžně nebo na vyžádání. Naměřená data se ukládají ve formátu IES nebo EULUMDAT. [39]

Výše jmenované parametry charakterizující optický prvek jsou měřeny na finálním produktu. Na všechny tyto hodnoty bude mít zcela jistě vliv použitý materiál. S tímto faktorem souvisí životnost produktu a zachování naměřených parametrů po dobu životnosti. Materiály by měly být odolné UV záření, slunečnímu záření, vlhkosti, fyzické zátěži apod.[39]

Také je potřeba se zamyslet nad použitím reflektoru nebo čočky v dané aplikaci. Například ve svítidle pro silniční osvětlení je použita matrice s desítky kusů čipů LED. Je tedy velmi výhodné použití čoček pro každý čip. Výhodou čočky oproti reflektoru je přesná distribuce světla. [39]

4 SMĚRNICE

V roce 1913 byla založena mezinárodní komise pro osvětlení známá pod označením CIE z francouzského názvu „The Commission Internationale de l'Eclairage“. Komise se věnuje celosvětové spolupráci a výměně informací o záležitostech týkajících se vědy a umění, světla a osvětlení, barvy a vidění, fotobiologii a podobným odvětvím vědy. CIE se stala profesionální organizací a je uznávaná mezinárodním normalizačním orgánem ISO. [19]

4.1 Směrnice CIE 127:2007

Tato směrnice popisuje doporučené postupy při měření LED. Není však závazná jako je tomu například u norem ČSN.

Světelné zdroje LED se svým charakterem liší od dalších světelných zdrojů. Proto CIE zavedla nové veličiny, které zdroje LED charakterizují a definují podmínky měření. Podrobně se zde píše o měření průměrné svítivosti, celkovém a částečném světelném toku a vyzařovaném spektru LED. Pro měření substituční metodou byla stanovena standardní LED, která musí být kalibrována ve státní metrologické laboratoři nebo laboratoři spolupracující. [20]

4.1.1 Kategorie měření LED

Z pohledu vývojového střediska a průmyslové aplikační výroby můžeme kategorizovat měření LED:

- laboratorní měření,
- hromadné měření.

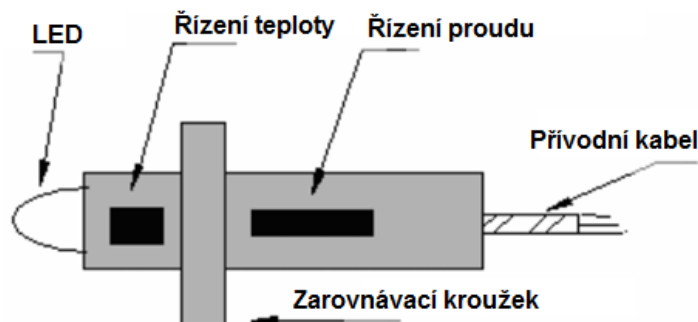
Výrobce nejprve musí vyrobit prototyp, který následně proměří v laboratoři. Tím se získají výsledky charakterizující výrobek. Toto měření se provádí pro každý jiný typ LED, neboť zcela určitě bude mít odlišné parametry. [20]

Hromadné testování se provádí ve výrobním středisku. Testuje se každý výrobek nebo určitý vzorek. Měření probíhá mimo laboratoř a je zde potřeba kalibrované standardizované LED, která má stejné charakteristické vlastnosti jako jsou LED, jež mají být testovány hromadně. Test musí být zároveň přizpůsoben požadavkům, tedy vysoké rychlosti testování velkého množství vzorků. Proto se mohou měřicí podmínky zjednodušit. Test bude s největší pravděpodobností založen na jednoduché přímé substituční metodě, kde se budou porovnávat charakteristiky kalibrované standardizované LED a měřeného vzorku s určitou tolerancí. [20]

4.1.2 Vlivy na fotometrické veličiny

Vliv na výsledné fotometrické veličiny mají vestavěné reflektory, čočky, rozptylový materiál, barevné filtry nebo fluorescenční vrstva. [20]

Nezanedbatelné jsou také elektrické provozní podmínky. Při nižších proudech se světelný tok zvyšuje v poměru vyšším, než je příkon. Tato oblast provozu se nazývá start-up rozsah. Při vysokých proudech nastává nasycení a světelný tok nemá strmou, ale plochou charakteristiku v poměru s příkonem. To můžeme vysvětlit především ohřevem LED čipu. Abychom zajistili konstantní výstup fotometrických (optických) veličin, nestačí použít pouze napěťový/proudový stabilizátor, ale je potřeba také regulovat teplotu čipu tak, aby byla konstantní. [20]



Obr. 4-1 Schéma referenčního standardu LED s teplotní a proudovou stabilizací [20]

(Popisky obrázku byly přeloženy z AJ)

Na Obr. 4-1 je zobrazeno schéma referenčního standardu LED s teplotní a proudovou stabilizací, které je doporučováno organizací CIE. Zleva je světelný zdroj LED, dále je jednotka pro řízení tepla, kroužek pro zarovnání při instalaci, jednotka pro řízení proudu a napájecí kabel.

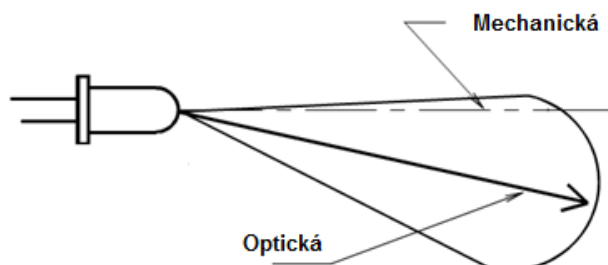
Aplikované provozní podmínky elektrické a teplotní v praxi, které ovlivňují optický výstup LED, lze rozdělit:

- modulovaný proud,
- pulzní provoz,
- multiplexní provoz. [20]

Dále jsou to vlivy dané návrhem, výrobou a aplikací. Je to například propustné napětí, okolní teplota, nastavení pracovního bodu apod. Vliv teploty čipu se projevuje posunutím vrcholu vlnových délek nebo je tu vliv na účinnost. [20]

4.1.3 Geometrická a optická osa

Světelné zdroje LED mají geometrickou osu danou svým obalem a optickou osu. Nicméně optická osa emitovaného záření se nemusí shodovat s geometrickou osou, jak je naznačeno na Obr. 4-2. Oblast emitace se může lišit tvarem, velikostí apod. Při výběru LED, která bude použita jako referenční standard, je důležité, aby se obě osy, geometrická i optická, shodovaly. [20]



Obr. 4-2 Znázornění mechanické (geometrické) a optické osy LED [20]

4.1.4 Průměrná svítivost LED

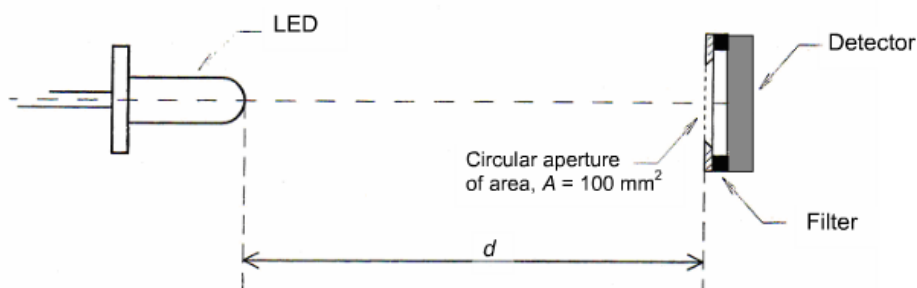
V praxi probíhá měření, které ne vždy splňuje podmínku bodového zdroje. Pak se již nejedná o svítivost definovanou v kapitole 2.2, ale o formu průměrovaných svítivostí. Proto se musela definovat přesná geometrie pro měření, která lze aplikovat na širokou škálu LED, aby byla možnost srovnání LED produktů i od jiných výrobců. [20]

Společnost CIE se rozhodla popsat měření při „blízkém poli“ (přeloženo z angličtiny „near-field“) a definovala dvě standardní měření, označené A a B. Obě podmínky zahrnují použití detektoru s kruhovým vstupním otvorem, který má plochu 100 mm^2 (odpovídá průměru

cca 11,3 mm). LED by měla být umístěna směrem k detektoru tak, že mechanická osa LED prochází středem otvoru detektoru, jak je to naznačeno na Obr. 4-3. Odlišnost mezi podmínkami A a B jsou vzdálenosti mezi LED a detektorem, a to:

- pro CIE standardní stav A je vzdálenost $d = 316 \text{ mm}$,
- pro CIE standardní stav B je vzdálenost $d = 100 \text{ mm}$. [20]

Měření typu A odpovídá prostorovému úhlu $0,001 \text{ sr}$ a měření typu B prostorovému úhlu $0,01 \text{ sr}$. [20]



Obr. 4-3 Znáznornění CIE standardů typu A a typu B pro měření průměrné svítivosti LED [20]

4.1.5 Částečný světelný tok

Částečný světelný tok se používá pro konkrétní aplikace LED. Je definován jako tok, který vyzařuje z LED v daném úhlu. Střed v mechanické ose LED je určen kružnicí o průměru 50 mm a vzdálenost je měřena od špičky LED, jak je to naznačeno na Obr. 4-4. Vzdálenost d se stanoví dle požadovaného úhlu kužele x , jak je uvedeno v následujícím vzorci:

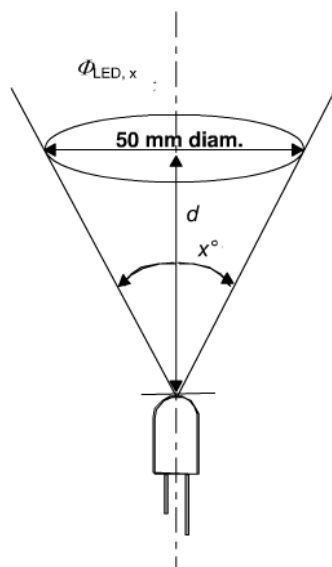
$$d = \frac{25}{\tan \frac{x}{2}} \text{ (m; } ^\circ \text{)} \quad (4.1)$$

kde $0^\circ \leq x \leq 180^\circ$. [20]

Částečný světelný tok je značen veličinou $\Phi_{LED, x}$, kde hodnota x je úhel kužele ve stupních. Vztažný bod tohoto úhlu je špička krytu LED, i když to není skutečné centrum vyzařování světla.

Tento bod se užívá, protože je snadné ho identifikovat pro každý typ LED. Oproti tomu centrum vyzařování světla nelze určit jednoznačně a je to časově náročné. [20]

Diametrální clona o průměru 50 mm je pevně stanovena, aby se měření mohlo kdykoli opakovat a reprodukovat. Tok procházející touto clonou se nazývá dílčí světelný tok. [20]



Obr. 4-4 Částečný světelný tok LED [20]

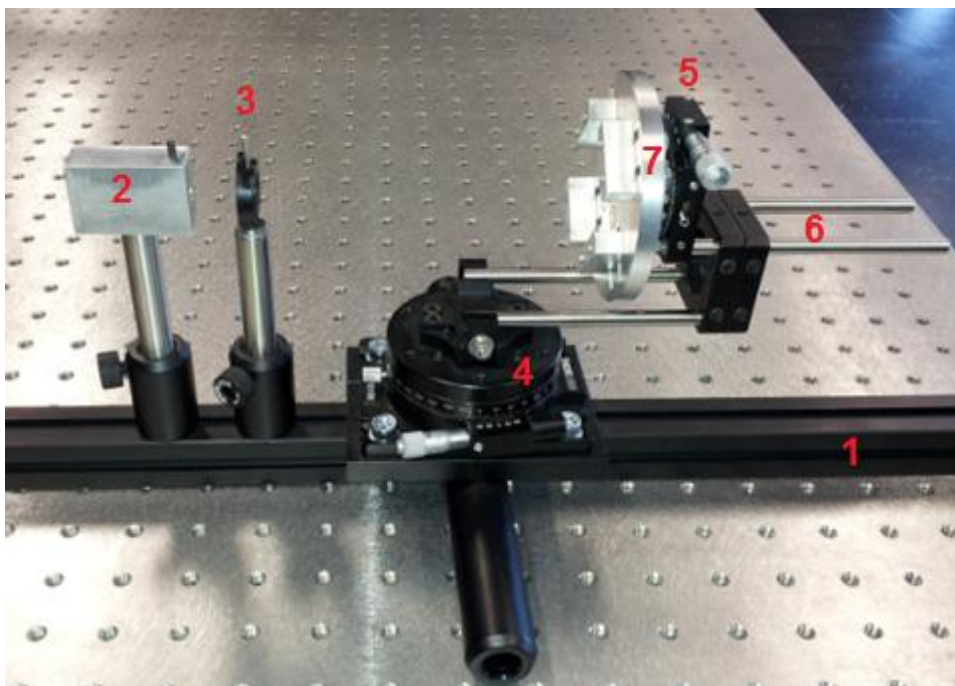
5 PRAKTICKÁ ČÁST

5.1 Návrh goniofotometru

Pro měření rozložení svítivosti LED s optickými moduly je zapotřebí přístroje zvaného goniofotometr viz kap. 2.2.1 a 2.2.2. Jelikož se v laboratoři světelné techniky žádné vhodné goniofotometry nenacházely, přistoupilo se k vlastnímu návrhu.

Požadavkem bylo navrhnout goniofotometr pro měření LED s optikami v rovině C - γ . Detektor s clonkou musí být v ose s měřeným vzorkem. Vzdálenost detektoru a měřeného vzorku musí být variabilní se střední hodnotou 100 mm. Měřený vzorek LED bude potřeba ukotvit v upínacím systému, který je potřeba navrhnout.

Finální sestava goniofotometru je vyobrazena na fotografii *Obr. 5-1*. Skládá se z následujících dílů: 1. Osová základna, 2. Upínák světlovodu s kosinusovým nástavcem, 3. Clonka, 4. Rameno s natáčením v úhlu γ , 5. Rameno s natáčením v rovině C , 6. Osové posouvání vzdálenosti světelného zdroje a kosinusového nástavce, 7. Upínací mechanismus světelného zdroje, 8. Další díly (využité pro ukotvení a nastavení požadované polohy).



Obr. 5-1 Navržená sestava goniofotometru pro měření křivek svítivosti LED s optikami

5.2 Návrh upínacího systému goniofotometru

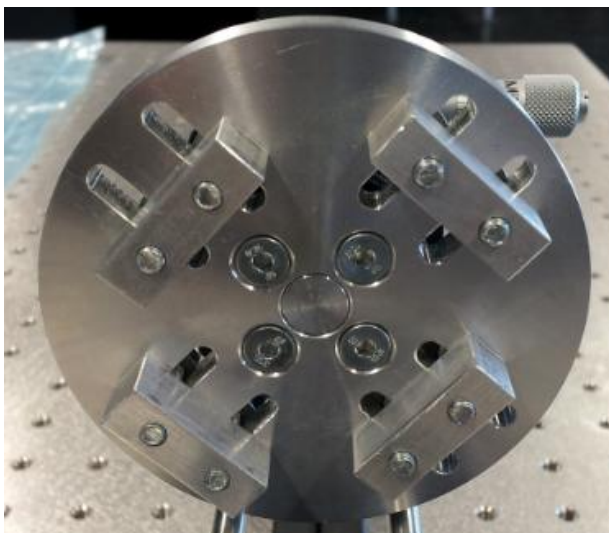
Součástí goniofotometru je upínací systém, ve kterém bude ukotven měřený vzorek. LED čip je umístěn na kovové základně. Zde jsou napájeny i přívodní kontakty pro dodávku elektrické energie. Základna čipu je dále přišroubována na pasivní chladič s žebrováním. Právě za tento chladič bude LED upnuta v upínacím systému goniofotometru. Rozměry chladiče jsou jedním z hlavních požadavků na upínací mechanismus.

Výchozí požadavky pro návrh upínacího systému goniofotometru jsou následující:

- a) Přizpůsobení upínacích svorek a jejich vzdálenosti rozměrům chladiče LED.
- b) Požadavek na průměr závitu pro upevnění do ramena s natáčením v rovině *C*.
- c) Rozměrové přizpůsobení základny upínacího systému finální sestavě goniofotometru.
- d) Rozměrové a fyzikální přizpůsobení upínacího systému pro LED (dostatečný přítlak na chladič LED).

Na základě těchto požadavků byl proveden návrh upínacího systému goniofotometru za použití programu Autocad 2011 a Autodesk Inventor 2011. Upínací systém se skládá ze základny se šroubovicí. Do základny jsou vyřezány otvory pro upevnění úchytek. Úchytky se ukotví jednoduše pomocí šroubu s maticí. LED bude uchycena za svůj chladič.

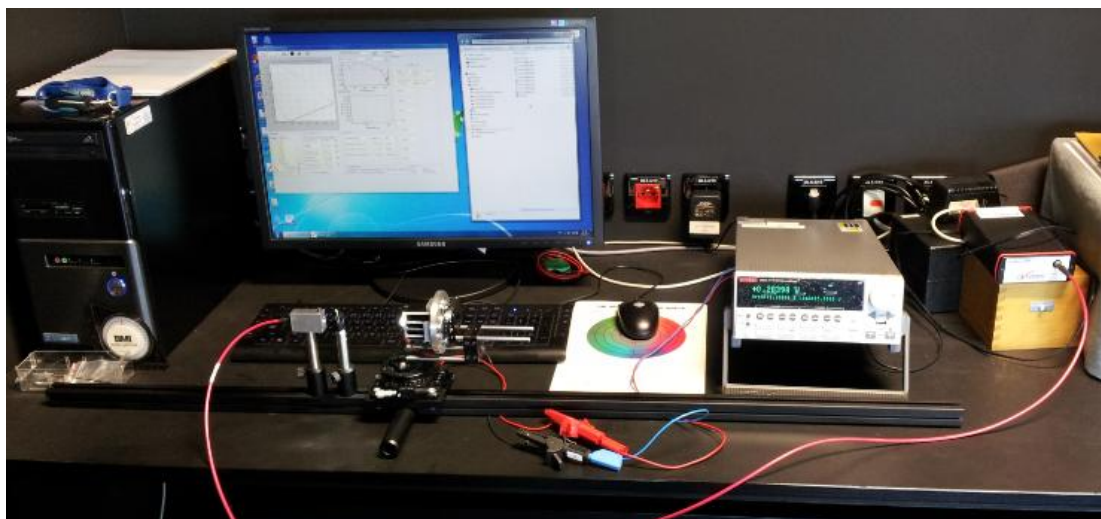
Návrh dostupný v *Příloze F-1* a *Příloze F-2* byl zhotovitelem pozměněn z důvodu výrobního postupu. Šroubovice základny byla vyrobena jako samostatný díl, který se upevní k základně pomocí šroubů. Hotový výrobek upínacího systému pro LED je zobrazen na *Obr. 5-2*.



Obr. 5-2 Upínací systém pro LED

5.3 Pracoviště

Veškerá měření probíhala v laboratoři světelné techniky. V této laboratoři jsou vhodné podmínky pro měření fotometrických veličin. Laboratoř má temnou matnou černou výmalbu, která nezpůsobuje odrazy světla. Uvnitř laboratoře jsou černé žaluzie pro odstínění denního světla a navíc jsou po místnosti umístěny černé závěsy oddělující ostatní pracoviště. Tím nedochází k ovlivňování měření od jiných úloh a je možné měřit v laboratoři více úloh současně. Organizace prostoru pro měření LED s optickými moduly je na fotografii *Obr. 5-3*.



Obr. 5-3 Organizace pracoviště pro měření LED s optickými prvky

5.3.1 Přístroje pro měření a měřené vzorky

Měření probíhalo na černém stole, kde byla umístěna tyčová fotometrická lavice s goniofotometrem a detektorem, PC s programem Avantes, který zaznamenával naměřená data a dalšími přístroji. V případě potřeby byla dostupná lampička nebo hlavní zářivkové osvětlení na stropě.

V průběhu měření byly použity následující měřicí přístroje:

- 1) PC se softwarem AvaSoft© 7.3 Full – 2008 Avantes.
- 2) Laboratorní zdroj KEITHLEY 2602A SYSTÉM SourceMeter® s kabeláží a izolovanými krokodýlky na konci.
- 3) Spektrometr AvaSpec-2048 Avantes (Rozsah: 175 nm - 1100 nm) s difrakční mřížkou a napájecím zdrojem KINGPRO KAD-0103 +12 VDC, 1,5 A.
- 4) Optické vlákno AVANTES FC – UV200-2, 8485824.
- 5) Kosinusový nástavec s bílým terčíkem o průměru $d = 3,9$ mm.
- 6) Goniofotometr s clonkou a nástavcem pro kosinusový nástavec s optickým vláknem.
- 7) Vodováha, šestihranné a další klíče, sloužící pro upevnění šroubů.
- 8) Vzorky LED XT-E, XP-E, a XP-G viz Tab. 5-1. Fotografie vzorků LED jsou dostupné v Příloze C-2.

Tab. 5-1 Označení měřených vzorků LED

Číslo vzorku	Označení LED
1	XT-E
2	XP-E
3	XP-G

- 9) Vzorky optických prvků jsou v tabulce *Tab. 5-2*. Fotografie vzorků optických prvků jsou rovněž dostupné v *Příloze C-1*.

Tab. 5-2 Označení a názvy měřených vzorků optických prvků

Číslo vzorku	Označení optiky	Celý název
1	C10757	C10757_Strada-DW-XR
2	C10924	C10924_STRADA-B
3	C10966	C10966_STRADA-C
4	C11185	C11185_Strada-DN-XR
5	CA10823	CA10823_STRADA-A
6	CA10927	CA10927_STRADA-B
7	CA10932	CA10932_FLARE-B
8	CA11256	CA11256_STRADA-DW
9	FA10343	FA10343_CRS-WW
10	FA10665	FA10665_CXP-M
11	FA10708	FA10708_CXP-W
12	FCA10306	FCA10306_CRS-O
13	FCA10328	FCA10328_CRS-SS

5.4 Postup měření

5.4.1 Instalace LED do goniofotometru

Do upínacího systému goniofotometru se umístila LED a vycentrovala se do polohy, aby čip LED byl v ose se clonkou a s otvorem pro kosinový nástavec optického vlákna. Pro kontrolu je nutné goniofotometr s LED otáčet napříč polorovinami C - γ a přitom se kontroluje pohledem do otvoru kosinového nástavce, zda je čip LED stále v ose. Pro zjednodušení a přesnější nastavení by se mohlo užít laserové ukazovátko jako srovnávací osa. Dle směrnice CIE 127:2007, pro měření průměrné svítivosti, byl zvolen standardizovaný stav B, který udává, že vzdálenost mezi čipem LED popř. optikou a detektorem světla (kosinový nástavec) má být 100 mm.

Zapneme laboratorní zdroj KEITHLEY. Zvolíme proudový zdroj. Napětí omezíme na 5 V a proud nastavíme na 100 mA. Výstupní svorky (krokodýlky) ze zdroje připojíme ke kabeláži LED a tlačítkem spustíme zdroj. Ověříme tak funkčnost LED.

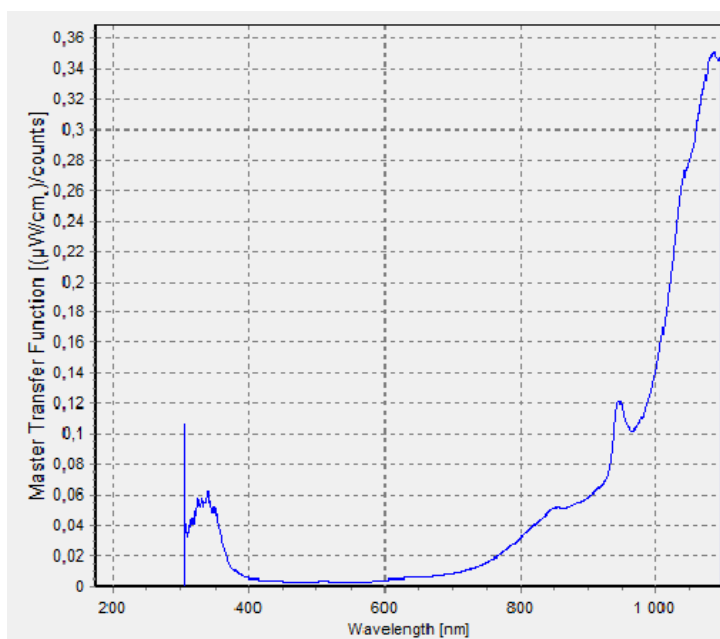
5.4.2 Kalibrace spektrometru

Světlo vyzářené z čipu LED dopadající přes clonku na kosinový nástavec je transportováno optickým vláknem do spektrometru AvaSpec-2048 Avantes. Optické vlákno a kosinový nástavec však nejsou bezztrátové. Optické vlákno může mít odlišné ztráty na různých vlnových délkách. Vzniká tedy odchylka od skutečných dat a je nutné provést kalibraci. Optické vlákno je označeno nápisem UV-VIS (z angličtiny „Ultraviolet-Visible“). Jak název napovídá, optické vlákno přenáší kvalitně záření v UV a viditelné spektrální oblasti, ale v oblasti IR je značný útlum. [40]

Kalibrace se provede na dostupný normovaný světelný zdroj (referenční lampu) tj. halogenovou žárovku, která je součástí soustavy AvaLight HAL-CAL. Spektrální data jsou

známá a dostupná v datovém souboru. Vlivem používání a stárnutí halogenové žárovky dochází k jisté odchylce mezi kalibrační a skutečnou spektrální křivkou. Tím se do měření zanáší chyba. Jelikož je jako referenční zdroj použita halogenová žárovka a měřeným vzorkem je LED, budou se lišit i spektrální charakteristiky. Halogenová žárovka oproti LED vyzařuje hodně tepla (infračervené záření – IR), ale málo energie v ultrafialových vlnových délkách (UV) a vzniká tak další odchylka. Popsané chyby v předchozím a současném odstavci se mohou částečně eliminovat použitím referenčního zdroje LED a použitím optického vlákna s vhodnou přenosovou spektrální charakteristikou. [40]

Zhasneme všechna světla v laboratoři, zatáhneme žaluzie a černé závěsy v měřicím prostoru. Rozsvítíme si pouze menší lampičku, abychom byli schopni provádět nezbytné úkony měření. Optickým vláknem propojíme spektrometr a kalibrační lampu, kterou rozsvítíme a necháme ustálit její světelný tok po vhodný čas. Na PC spustíme program AvaSoft© 7.3 Full – 2008 Avantes, otevřeme si záložku „Absolute Irradiance Measurement“ a zvolíme „Perform Intensity Calibration“. Spustíme kalibraci tlačítkem „Start Calibration“ a zvolíme vhodnou integrační konstantu. Provedeme kalibraci na tmě (kalibrační lampa je odpojena a do optického vlákna nevstupuje žádné světlo) a na světlo (optické vlákno je připojeno ke kalibrační lampě). Výsledkem je spektrální kalibrační křivka naměřená programem Avasoft viz *Obr. 5-4*. Naměřené kalibrační data uložíme do souboru pro další využití. Je zde možnost použít funkci průměrování výsledků z více měření pro přesnější výsledky. Po kalibraci optické vlákno odpojíme od kalibrační lampy.



Obr. 5-4 Spektrální kalibrační křivka zjištěná v programu Avasoft

5.4.3 Nastavení programu AvaSoft© 7.3 – 2008 Avantes

Optické vlákno spolu s kosinovým nástavcem vložíme do otvoru pro upínák kosinového nástavce (viz *Obr. 5-1*) a upevníme ho pomocí šroubku. Spustíme laboratorní zdroj. V programu AvaSoft© 7.3 Full – 2008 Avantes v menu „Application“ vybereme položku „Absolute Irradiance Measurement“, zvolíme záložku „Calibration“ a načteme kalibrační data, která byla

v předchozím kroku uložena do souboru. Vyhledáme záložku „Irradiance Chart“ zvolíme typ detektoru „CC-UV/VIS or Fiber“. V možnostech typu měření „Colorimetry“, „Radiometry“, „Photometry“, „Peak Measurement“ zaškrtneme všechny dostupné proměnné. „CIE standard Observer“ zvolíme 2°. Tyto veličiny se budou ukládat při každém měření do souboru, který pojmenujeme a uložíme v nastavení „Save Settings“ pomocí tlačítka „Change Output File“. Nastavení potvrdíme tlačítkem „OK“. Screeny nastavení v programu AvaSoft jsou dostupné v *Příloze D-1*.

Zhasneme malou lampičku. Pracovní plocha stolu bude osvětlena pouze monitorem, na kterém byl nastaven co nejnižší jas. Spustíme měření tlačítkem start. V nastavení „Peak Measurement“ zvolíme rozsah vlnových délek pro měření. V našem případě bylo nastaveno jen viditelné spektrum, tedy rozsah vlnových délek od 380 nm do 780 nm. V nastavení „Experiment Setup“ zapíšeme vzdálenost detektoru a LED 100 mm (vzdálenost k čipu nebo optice). V nastavení „Radiometry“ je možnost zvolit zobrazení dalších veličin. Do kolonky „Average“ zadáme hodnotu 3, což znamená, že výsledné proměnné se počítají z průměru posledních tří naměřených hodnot. K uložení naměřených hodnot by se mělo přistoupit po trojnásobku integračního času. Fotografie okna programu AvaSoft pro měření je rovněž dostupná v *Příloze D-1*.

5.4.4 Měření pomocí programu AvaSoft

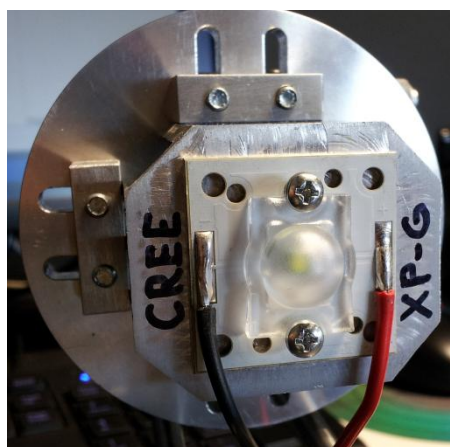
Pomocí tlačítka s černým čtvercem provedeme kalibraci na tmu tak, že zakryjeme detektor. Otáčíme goniofotometrem s LED a sledujeme graf s počtem nasbíraných pulsů pro dominantní složku spektra „A/D Counts“ a hledáme maximum. Toto maximum by mělo být kolem 14 000 impulsů. V případě nižšího počtu impulsů stiskneme tlačítko integrace a program automaticky zvyšuje čas integrace až do té doby, dokud počet nasbíraných impulsů nedosáhne právě 14 000. Stoupá-li čas integrace do vyšších hodnot (tisíce milisekund), automatické nastavení integračního času zastavíme a ručně nastavíme odhadem. Pokud se zobrazí varování o saturaci je potřeba snižovat čas integrace ručně, dokud toto varování nezmizí. Po každé změně integračního času je nutné kalibrovat na tmu, viz fotografie dostupná v *Příloze D-1*.

Základem následujícího postupu je předpoklad, že vzorek i optiky jsou symetrické podle obou rovin *C0-C180* a *C90-C270*. Vzorek LED měříme nejdříve samostatně tj. bez optického prvku. Měření bude probíhat v rovinách *C0-C180* až *C90-C270* po 15° na základě *Obr. 2-3*. V každé rovině budeme vzorek pootáčet v rozsahu úhlů $\gamma = \pm 100^\circ$ s diferencí $\Delta\gamma = 5^\circ$. Goniofotometr uvedeme do výchozí polohy pro rovinu *C0-C180* s úhlem $\gamma = 0^\circ$, tj. čip LED je v ose a kolmý k detektoru. Na tmu je již kalibrováno, po uplynutí trojnásobku doby integračního času uložíme naměřená data. Pro každou polorovinu, tj. zvlášť pro *C0* a zvlášť pro *C180* atd., byla založena vlastní složka z důvodu přehlednosti. Každé dílčí měření se pojmenovalo po polorovině *C* a úhlu γ z důvodu systematickosti (použil se formát např. „C180_5“). Po dokončení měření se zapsal příkon zobrazený na displeji laboratorního zdroje.

Pro srovnání byly měřeny data i při proudu 1 A. Na laboratorním zdroji se nastavil stabilizovaný proud 1 A, při limitním napětí 5 V. Srovnávací měření bylo provedeno jen pro tři hodnoty v polorovině *C0* při úhlech $\gamma = 0^\circ, 10^\circ$ a 20° . Poté se opět zapsal příkon z displeje laboratorního zdroje.

Dále se přistoupilo k měření vzorku LED s optickými prvky. Aktuální okno v programu AvaSoft© 7.3 Full – 2008 Avantes jsme zavřeli, výstup laboratorního zdroje se vypnul a zapnula se malá lampička. Na LED se aplikoval optický prvek, viz *Obr. 5-5*, přilepením nebo

přišroubováním. Nastavila se vzdálenost detektoru a špičky optického prvku na 100 mm, na laboratorním zdroji nastavíme zpět proud 0,1 A, vypneme lampičku a opakujeme postup měření.



Obr. 5-5 Instalovaný optický modul pomocí šroubů na čipu LED

Výstupem programu AvaSoft© je textový soubor pro každou polovinu, do kterého se uložily informace a proměnné při měření jednotlivých úhlů γ (fotometrické, radiometrické a kolorimetrické veličiny). Součástí výstupu také byly jednotlivé soubory pro každý úhel γ , a to screen měřicího okna programu AvaSoft©, spektrální data výkonu zářivého toku příslušící vlnovým délkám v rozsahu $\lambda = (174,852 \text{ nm} - 1100,203 \text{ nm})$.

Pomocí programu AvaSoft© konvertujeme data ze souboru s koncovkou .IRR do souboru .XLS, aby bylo možné naměřená data dále zpracovávat. V hlavním okně programu AvaSoft© otevřeme záložku „File“, zvolíme „Convert Graph“ a dále „To Excel“. V nabídce označíme všechny soubory s koncovkou .IRR a potvrdíme konverzi. Konvertovaná data se zobrazí přímo v programu Microsoft Excel. Provedeme uložení konvertovaných dat na disk.

5.5 Zpracování naměřených dat

Jak jsme se dozvěděli v předchozí kapitole, výsledkem měření byl textový soubor a datový soubor Microsoft Excel. Textový soubor obsahuje následující data:

- kolorimetrická
 - čistota
 - dominantní vlnová délka
 - doplňková dominantní vlnová délka
 - trichromatické souřadnice
 - trichromatické složky barevného prostoru
 - souřadnice pro další kolorimetrické prostory
 - teplota chromatičnosti
- fotometrická
 - osvětlení

- světelný tok dopadající na plochu detektoru
- světelný tok v prostoru 4π (vypočítaný z jednoho měření)
- svítivost (vypočítaná ze vzdálenosti detektoru a čipu LED nebo optiky),

dále zde jsou obsažena data radiometrická a spektrofotometrická. V tabulkovém procesoru Microsoft Excel jsou zaznamenány optické energie emitované ze světelného zdroje spolu s příslušnými vlnovými délkami ve spektrálním rozsahu $\lambda = (174 - 1100)$ nm.

Pro další postup a výpočty využijeme naměřené hodnoty svítivosti, teploty chromatičnosti a data optické energie, ovšem ve spektrálním rozsahu pro oko viditelným, tj. $\lambda = (380 - 780)$ nm.

Pro zpracování měření byl zvolen program Microsoft Excel. Bude nutné potřebné naměřené data vyextrahovat z uložených souborů. Z hlediska času by bylo kopírování vybraných dat velmi náročné. Navíc se jedná o opakované úkony. Pro urychlení celé extrakce byl vytvořen skript v jazyce Python. Zdrojový kód je dostupný v *Příloze B-1*. Skript lze otevřít i v poznámkovém bloku v prostředí Windows což je výhodné pro nastavení vstupních parametrů. Zadává se pouze cesta k adresáři s výsledky měření a cesta k uložení nového souboru. Skript nalezne v textovém souboru požadované hodnoty a zapíše je do tabulkového procesoru Excel. Stejně kroky se provedou s daty optického výkonu s tím, že záporné hodnoty se přepíší na nuly. Záporné hodnoty optického výkonu se vyskytují při nižších intenzitách, kdy šum již není v pozadí, ale převládá a projevuje se kvalita provedení kalibrace na tmu.

Cílem zpracování naměřených dat jsou parametry hodnotící optické prvky a grafické průběhy křivek svítivosti, teplot chromatičnosti a spektrálních charakteristik.

5.5.1 Zpracování v Excelu

V programu Microsoft Excel byly zpracovány naměřená data svítivosti, teplot chromatičnosti.

Výstupem je účinnost měřených optických prvků, data křivek svítivosti v maticovém tvaru (dále budou zpracovány v programu Matlab) a grafické průběhy teplot chromatičnosti.

Než se k těmto výsledkům dospěje, musí naměřená data projít úpravami a korekcemi, kterým se budeme věnovat v následujících kapitolách. Abychom určili účinnost optických modulů, je nezbytné vypočítat světelný tok LED a soustavy s optickým prvkem.

5.5.1.1 Korekce naměřených dat

Veškerá data zpracovávaná v Microsoft Excel jsou dostupná v *Příloze CD*. V nastavení experimentu (program AvaSoft) byla zapsána vzdálenost detektoru a čipu LED (optiky) 0,01 m. Avšak nastavená vzdálenost na goniofotometru byla 0,1 m. Proto je nutné provést korekci svítivosti na tuto vzdálenost. Korekčním koeficientem k_I pak vynásobíme svítivosti.

$$k_I = \frac{I_K}{I_M} = \frac{E \cdot r_K^2}{E \cdot r_M^2} = \frac{0,1^2}{0,01^2} = \frac{0,01}{0,0001} = 100 \quad (-; \text{cd, cd; lx, m, lx, m}) \quad (5.1)$$

Jak již bylo řečeno, zdroj i optické prvky jsou symetrické podle rovin $C0-180$ a $C90-270$. Dle symetrie se naměřená data v těchto rovinách sobě rovnají (s odchylkami nepřesností měření). Můžeme tedy naměřené svítivosti odpovídajících úhlů γ v těchto rovinách zprůměrovat. V *Tab. 5-3* jsou zapsány poloroviny, které se budou průměrovat.

Tab. 5-3 Průměrované poloroviny

Průměrované poloroviny
C0 – C180
C15 – C195
C30 – C210
C45 – C225
C60 – C240
C75 – C255
C90 – C270

5.5.1.2 Celkový světelný tok

V této kapitole je uveden příklad výpočtu celkového světelného toku soustavy LED XP-E s optickým modulem FCA10328. V Tabulce Tab. 5-4 jsou již zprůměrovaná data naměřených svítivostí a vypočítané hodnoty dalších veličin vedoucí k určení celkového světelného toku soustavy.

Tab. 5-4 Výpočet celkového světelného toku

Rovina	C0	C15	C30	C45	C60	C75	C90	I _{stř}	Zonální pás		Ω	I _{stř pásu}	Světelný tok
Úhel γ	I	I	I	I	I	I	I	[cd]	od	do	[sr]	[cd]	[lm]
[°]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]						
0	263,6950	262,9850	263,3950	263,4700	264,1300	262,9400	262,8750	263,3675	0	5	0,0239	239,4171	5,7243
5	217,7350	214,7350	214,7950	217,0150	216,4700	214,4050	213,0250	215,4667	5	10	0,0715	160,1921	11,4611
10	105,0450	107,3500	104,6500	104,9400	104,4750	103,9150	103,3050	104,9175	10	15	0,1186	65,2660	7,7431
15	25,4650	24,4000	26,7250	26,5250	25,8700	24,9100	25,0500	25,6146	15	20	0,1648	15,9938	2,6362
20	6,0495	6,2345	6,2150	6,5235	6,5550	6,3940	6,5830	6,3730	20	25	0,2098	4,3851	0,9198
25	2,4765	2,2430	2,4365	2,1835	2,4960	2,4960	2,5785	2,3971	25	30	0,2531	1,9371	0,4903
30	1,2385	1,3120	1,2760	1,6250	1,6310	1,6905	1,4170	1,4770	30	35	0,2945	1,1958	0,3522
35	0,9448	0,7540	0,8391	1,1180	1,0220	0,8099	0,9431	0,9145	35	40	0,3337	0,7699	0,2569
40	0,7007	0,5167	0,4131	0,6880	0,7337	0,5993	0,9018	0,6253	40	45	0,3703	0,6227	0,2306
45	0,7322	0,4979	0,4829	0,5422	0,6828	0,7651	0,7663	0,6200	45	50	0,4041	0,5142	0,2078
50	0,4390	0,2198	0,5343	0,3300	0,4203	0,5398	0,3742	0,4084	50	55	0,4349	0,3503	0,1523
55	0,0996	0,1327	0,2396	0,3001	0,3626	0,5209	0,2952	0,2922	55	60	0,4623	0,2451	0,1133
60	0,0606	0,2211	0,3049	0,1616	0,1227	0,2032	0,2881	0,1980	60	65	0,4862	0,1614	0,0785
65	0,1479	0,1469	0,1717	0,1107	0,0151	0,1660	0,1288	0,1248	65	70	0,5064	0,1182	0,0599
70	0,1340	0,0550	0,1666	0,0969	0,1359	0,0583	0,1809	0,1117	70	75	0,5228	0,1002	0,0524
75	0,0439	0,0309	0,1039	0,1390	0,0582	0,1201	0,1161	0,0887	75	80	0,5351	0,1315	0,0704
80	0,1692	0,1915	0,2816	0,1031	0,1863	0,1434	0,1110	0,1743	80	85	0,5434	0,1934	0,1051
85	0,1985	0,2187	0,0395	0,2144	0,3067	0,2549	0,2829	0,2125	85	90	0,5476	0,1720	0,0942
90	0,0213	0,1951	0,0735	0,1800	0,1050	0,1391	0,1722	0,1316	90	95	0,5476	0,1698	0,0930
95	0,2908	0,3838	0,0920	0,1046	0,2153	0,1911	0,2325	0,2081	95	100	0,5434	0,1890	0,1027
100	0,3007	0,1704	0,0539	0,0604	0,0943	0,3961	0,1878	0,1699					
Celkový světelný tok:													30,9441

Příklad výpočtu pro střední svítivost:

$$\begin{aligned}
 I_{(0),stř} &= \frac{I_{C0} + I_{C90} + 2 \cdot (I_{C15} + I_{C30} + I_{C45} + I_{C60} + I_{C75})}{12} = \\
 &= \frac{263,6950 + 262,8750 + 2 \cdot (262,9850 + 263,3950 + 263,4700 + 264,1300 + 262,9400)}{12} = \\
 &= \underline{\underline{263,3675 \text{ cd}}}
 \end{aligned}$$

Prostorový úhel zonálního pásu $\gamma = (0 - 5)^\circ$:

$$\Omega_{(0-5)} = 2\pi \cdot (\cos \gamma_i - \cos \gamma_{(i+1)}) = 2\pi \cdot (\cos 0^\circ - \cos 5^\circ) = \underline{\underline{0,0239 \text{ sr}}}$$

Střední svítivost zonálního pásu:

$$I_{(0-5),stř} = \frac{I_{(0),stř} + I_{(5),stř}}{2} = \frac{263,3675 + 215,4667}{2} = \underline{\underline{239,4171 \text{ cd}}}$$

Světelný tok zonálním pásem pak bude:

$$\Phi_{(0-5)} = \Omega_{(0-5)} \cdot I_{(0-5),stř} = 0,0239 \cdot 239,4171 = \underline{\underline{5,7243 \text{ lm}}}$$

Celkový světelný tok soustavy získáme součtem všech dílčích zonálních toků:

$$\Phi = \sum_{n=0}^k \Omega_{i,i+1} = \Phi_{(0-5)} + \Phi_{(5-10)} + \dots + \Phi_{(95-100)} = 5,7243 + 11,4611 + \dots + 0,1027 = \underline{\underline{30,9441 \text{ lm}}}$$

5.5.1.3 Korekce na osovou symetrii

Naměřené svítivosti polorovin v úhlech $\gamma = 0^\circ$ (Tab. 5-4) mají být teoreticky totožné. Jsou to svítivosti měřené v ose v totožném bodu. V tabulce se ale sobě nerovnají. To je zřejmě způsobeno osovou odchylkou detektoru a LED. Proto je potřeba provést korekci na symetrii naměřených dat s následujícím postupem:

1. Proveďte se zprůměrování svítivosti polorovin C0 až C90 v úhlu $\gamma = 0^\circ$. Výsledná svítivost bude společná pro všechny poloroviny.
2. Původní rozdílné svítivosti se musí násobit korekčním koeficientem větším nebo menším jedné. Koeficient zjistíme iterací. Pro tento účel byl zhotoven skript v programu Matlab R2010a (Příloha B-2). Pro každou polorovinu je koeficient odlišný.
3. Zjištěným korekčním koeficientem násobíme všechny svítivosti v úhlech γ příslušné poloroviny. Přehled vypočítaných koeficientů pomocí iteračního cyklu je dostupný v tabulce Tab. 5-5. Koeficienty se vztahují na LED XP-E s optickým modulem FCA10328.
4. Výpočtem zjistíme celkový světelný tok. Přepočítané data korigované na osovou symetrii jsou dostupná v tabulce Tab. 5-6.

Lze pozorovat, že celkový světelný tok se změní až na třetím desetinném místě, což jsou tisíce lumenů. Prakticky je tedy korekce na osovou symetrii v tomto případě zanedbatelná.

Tab. 5-5 Koeficienty osové symetrie pro jednotlivé poloroviny

Polorovina	C0	C15	C30	C45	C60	C75	C90
Koef. symetrie	0,998713	1,001409	0,999850	0,999566	0,997068	1,001581	1,001828

Tab. 5-6 Výpočet celkového světelného toku s uvažováním korekce osové symetrie

Rovina	C0	C15	C30	C45	C60	C75	C90	I _{stř}	Zonální pás		Ω	I _{stř pásu}	Světelný tok
Úhel γ	I	I	I	I	I	I	I	[cd]	od do		[sr]	[cd]	[lm]
[°]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]						
0	263,3557	263,3557	263,3557	263,3557	263,3557	263,3557	263,3557	263,3557	0	5	0,0239	239,4058	5,7240
5	217,4549	215,0377	214,7630	216,9208	215,8354	214,7440	213,4145	215,4559	5	10	0,0715	160,1846	11,4606
10	104,9098	107,5013	104,6344	104,8945	104,1687	100793	103,4939	104,9133	10	15	0,1186	65,2631	7,7427
15	25,4322	24,4344	26,7210	26,5135	25,7942	24,9494	25,0958	25,6127	15	20	0,1648	15,9927	2,6361
20	6,0417	6,2433	6,2141	6,5207	6,5358	6,4041	6,5950	6,3727	20	25	0,2098	4,3848	0,9198
25	2,4733	2,2462	2,4361	2,1826	2,4887	2,4999	2,5832	2,3970	25	30	0,2531	1,9369	0,4902
30	1,2369	1,3138	1,2758	1,6243	1,6262	1,6932	1,4196	1,4769	30	35	0,2945	1,1956	0,3521
35	0,9436	0,7550	0,8389	1,1175	1,0190	0,8111	0,9448	0,9143	35	40	0,3337	0,7698	0,2569
40	0,6998	0,5174	0,4130	0,6877	0,7315	0,6002	0,9034	0,6252	40	45	0,3703	0,6226	0,2306
45	0,7312	0,4986	0,4828	0,5419	0,6807	0,7663	0,7677	0,6200	45	50	0,4041	0,5142	0,2078
50	0,4384	0,2201	0,5342	0,3298	0,4190	0,5406	0,3748	0,4084	50	55	0,4349	0,3503	0,1523
55	0,0995	0,1329	0,2395	0,3000	0,3615	0,5217	0,2957	0,2922	55	60	0,4623	0,2451	0,1133
60	0,0605	0,2214	0,3049	0,1615	0,1223	0,2035	0,2886	0,1980	60	65	0,4862	0,1614	0,0785
65	0,1477	0,1471	0,1717	0,1107	0,0150	0,1662	0,1290	0,1249	65	70	0,5064	0,1182	0,0599
70	0,1339	0,0551	0,1666	0,0969	0,1355	0,0584	0,1812	0,1116	70	75	0,5228	0,1002	0,0524
75	0,0439	0,0310	0,1039	0,1389	0,0580	0,1203	0,1163	0,0887	75	80	0,5351	0,1315	0,0704
80	0,1689	0,1918	0,2816	0,1030	0,1858	0,1436	0,1112	0,1743	80	85	0,5434	0,1934	0,1051
85	0,1983	0,2190	0,0395	0,2143	0,3058	0,2553	0,2834	0,2125	85	90	0,5476	0,1720	0,0942
90	0,0212	0,1954	0,0735	0,1799	0,1047	0,1393	0,1725	0,1316	90	95	0,5476	0,1699	0,0930
95	0,2904	0,3843	0,0920	0,1046	0,2147	0,1914	0,2329	0,2081	95	100	0,5434	0,1890	0,1027
100	0,3003	0,1707	0,0539	0,0603	0,0940	0,3967	0,1882	0,1700					
Celkový světelný tok:													30,9426

5.5.1.4 Vypočítané parametry charakterizující LED a optické prvky

Z naměřených dat lze určit další parametry, dle kterých lze hodnotit LED a optické moduly. Při měření byl zaznamenán elektrický příkon $P_I = 0,28333$ W. S celkovým světelným tokem soustavy jsme již obeznámeni. Z těchto dvou hodnot vypočítáme měrný výkon. Dále vypočítáme účinnost přeměny elektrické energie na světlo. Ze známého světelného toku zdroje LED XP-E a světelného toku soustavy XP-E s FCA10328 určíme optickou účinnost neboli účinnost optického modulu.

Měrný výkon:

$$M_z = \frac{\Phi_{sv}}{P_I} = \frac{30,943}{0,28333} = \underline{\underline{109,21 \text{ lm/W}}}$$

Účinnost přeměny elektrické energie na světlo:

$$\eta_{el} = \frac{M_z}{683} \cdot 100 = \frac{109,21}{683} \cdot 100 = \underline{\underline{15,990 \%}}$$

Účinnost optického modulu:

$$\eta_{opt} = \frac{\Phi_{opt}}{\Phi_{zd}} \cdot 100 = \frac{30,943}{35,672} \cdot 100 = \underline{\underline{86,742 \%}}$$

Aby bylo možné porovnání distribučních křivek svítivosti různých světelných soustav, je nutné přepočítat hodnoty na světelný tok 1000 lm. Ze znalosti světelného toku zdroje 1000 lm můžeme určit účinnost soustavy [37]:

V našem případě známe optickou účinnost η_{sv} . Dle vzorce 5.2 vypočítáme celkový světelný tok, který je již normovaný na světelný tok zdroje 1000 lm.

Svítivosti v tabulce *Tab. 5-6* násobíme takovým koeficientem, abychom získali výsledný celkový světelný tok právě 867,42 lm. Koeficient zjistíme v programu Microsoft Excel počátečním odhadem a následnou „ruční“ iterací. Právě s koeficientem $k_2 = 28,033109$ byl výsledný celkový světelný tok 867,42 lm; viz *Tab. 5-7*.

Tab. 5-7 Přepočet hodnot svítivosti na světelný tok 1000 lm

Rovina	C0	C15	C30	C45	C60	C75	C90	I _{stř}	Zonální pás		Ω	I _{stř} pásů	Světelný tok
Úhel γ	I	I	I	I	I	I	I	[cd]	od	do	[sr]	[cd]	[lm]
[°]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]						
0	7382,679	7382,679	7382,679	7382,678	7382,679	7382,679	7382,678	7382,679	0	5	0,0239	6711,289	160,463
5	6095,935	6028,175	6020,473	6080,965	6050,537	6019,941	5982,672	6039,899	5	10	0,0715	4490,473	321,276
10	2940,949	3013,596	2933,227	2940,518	2920,173	2917,666	2901,255	2941,047	10	15	0,1186	1829,526	217,052
15	712,9447	684,9721	749,0731	743,2556	723,0906	699,4088	703,5134	718,0048	15	20	0,1648	448,326	73,8967
20	169,3681	175,0188	174,1998	182,7946	183,2183	179,5271	184,8794	178,6470	20	25	0,2098	122,9206	25,7842
25	69,3347	62,9669	68,2925	61,1837	69,7655	70,0813	72,4155	67,1942	25	30	0,2531	54,2986	13,7430
30	34,6743	36,8313	35,7649	45,5340	45,5880	47,4649	39,7955	41,4030	30	35	0,2945	33,5168	9,8712
35	26,4516	21,1654	23,5177	31,3274	28,5659	22,7385	26,4864	25,6306	35	40	0,3337	21,5790	7,2006
40	19,6175	14,5051	11,5773	19,2770	20,5076	16,8254	25,3251	17,5273	40	45	0,3703	17,4534	6,4633
45	20,4980	13,9760	13,5352	15,1916	19,0835	21,4820	21,5196	17,3795	45	50	0,4041	14,4139	5,8251
50	12,2893	6,1701	14,9745	9,2455	11,7464	15,1548	10,5078	11,4483	50	55	0,4349	9,8197	4,2703
55	2,7884	3,7258	6,7143	8,4099	10,1336	14,6241	8,2905	8,1912	55	60	0,4623	6,8714	3,1766
60	1,6955	6,2073	8,5470	4,5282	3,4282	5,7053	8,0911	5,5516	60	65	0,4862	4,5258	2,2005
65	4,1394	4,1249	4,8130	3,1032	0,4209	4,6604	3,6161	3,5000	65	70	0,5064	3,3149	1,6787
70	3,7529	1,5446	4,6696	2,7152	3,7974	1,6358	5,0792	3,1298	70	75	0,5228	2,8081	1,4680
75	1,2294	0,8684	2,9114	3,8942	1,6270	3,3722	3,2605	2,4863	75	80	0,5351	3,6863	1,9727
80	4,7357	5,3759	7,8929	2,8887	5,2073	4,0264	3,1171	4,8863	80	85	0,5434	5,4210	2,9460
85	5,5587	6,1395	1,1083	6,0063	8,5726	7,1569	7,9437	5,9558	85	90	0,5476	4,8226	2,6409
90	0,5950	5,4770	2,0607	5,0438	2,9339	3,9056	4,8363	3,6894	90	95	0,5476	4,7615	2,6075
95	8,1401	10,7729	2,5795	2,9310	6,0187	5,3642	6,5296	5,8335	95	100	0,5434	5,2994	2,8799
100	8,4187	4,7847	1,5119	1,6918	2,6363	11,1201	5,2747	4,7652					
Celkový světelný tok:													867,417

5.5.2 Zpracování v Matlabu

Pro rychlé zhodnocení měření nestačí pouze tabulkové hodnoty, ale je důležitá představa o rozložení a distribuci světelného toku LED nebo soustavy s optickým modulem. Proto se přistoupilo k vizualizaci naměřených dat.

Grafický výstup byl proveden v programu Matlab R2010a. Skript je dostupný v *Příloze B-3*. Naměřené data zkopírujeme z Microsoft Excelu ve formátu matice. Sloupce náleží úhlům γ a řádky polorovinám C . Pro jedno měření je výstupem 2D polární graf křivek svítivosti a 3D polární grafický model rozložení křivek svítivosti. Zobrazený výstup byl navíc upraven pomocí editačních funkcí „Camera Toolbar“, „Print preview“. Výsledky byly uloženy do obrazových formátů a do dokumentu PDF ve vektorové grafice.

Grafické výstupy pro LED s optickými moduly jsou dostupné v *Příloze A-1* pro LED XP-E s optickými moduly, v *Příloze A-2* pro LED XP-G s optickými moduly a v *Příloze A-3* pro LED XT-E s optickými moduly.

V neposlední řadě byly zpracovány grafické výstupy spektrálních charakteristik. Z časového hlediska zpracování byly vybrány jen některé vzorky optických prvků pro hodnocení. Skript pro tvorbu grafů je dostupný v *Příloze I-1* a grafické výsledky spektrálních charakteristiky jsou v *Přílohách H-1 až H12*.

5.5.3 Formát EULUMDAT a jeho zobrazování

V Evropě se pro ukládání fotometrických dat používá jako standard soubor EULUMDAT (s příponou .ldt). Tento formát není oficiálně normalizován, avšak je firemními subjekty nabízen k výrobkům. Specifikace EULUMDAT je volně dostupná v [28].

Pro vytvoření souboru EULUMDAT byl zvolen program QLumEdit0.2.1 dostupný v [29]. QLumEdit0.2.1 je open-source, slouží pro tvorbu, editaci a export fotometrických dat do formátů HTML, PNG nebo IESna LM-63-1995. Jazyk je možné zvolit anglický nebo polský. Ovládání softwaru je jednoduché, avšak je důležité znát odborné anglické pojmy ze světelné techniky pro správné nastavení detailů a převodních koeficientů, s nimiž program QLumEdit0.2.1 pracuje. Ukázka vizuálního prostředí programu je dostupná v *Příloze D-2*.

V Microsoft Excelu jsou již uloženy hodnoty v cd/klm ve formátu, kde sloupce jsou poloroviny C a řádky úhly γ . Takto vytvořenou tabulku označíme spolu s názvy polorovin C a úhly γ , uložíme do paměti a vložíme do programu v záložce „Luminous intensity“. Dále v záložce „General“ nastavíme název měřeného prvku, název souboru, symetrii popř. další možnosti, v kartě „Lamps“ se zapíše vypočítaný světelný tok soustavy, teplota chromatičnosti, příkon světelného zdroje aj. Po nastavení všech potřebných parametrů soubor uložíme („File – Save As“).

Soubory EULUMDAT je možné prohlížet v celé škále softwaru. Například program IES Viewer 3.1 [30] slouží pro prohlížení souborů EULUMDA, vykreslování 2D polárních grafů v jednotlivých polorovinách, rendrování světelného toku ve tmě, ukládání grafů apod. Ukázka vizuálního prostředí programu je dostupná v *Příloze D-2*.

Jasnou představu o měřené světelné soustavě získáme z 3D modelu křivek svítivosti. Tento typ modelu podporuje např. software ILEXA Ray-Viewer 2013 [31], který slouží v první řadě k analýze a také k vizualizaci naměřených dat. Ukázka vizuálního prostředí programu je dostupná v *Příloze D-2*. Grafické výsledky jsou podobné jako v Matlabu, avšak čas potřebný k získání

grafických výsledků je v případě softwarových prohlížečů EULUMDAT mnohonásobně kratší. Soubory EULUMDAT lze rychle prohlížet, analyzovat, provádět výpočty a jiné operace, ukládat obrázky grafů v každém podporujícím programu. Oproti tomu v Matlabu je potřeba vytvořit skript, načíst (překopírovat) naměřená data z Excelu a ve výsledku grafy upravovat.

6 HODNOCENÍ OPTICKÝCH PRVKŮ

6.1 Úvod do hodnocení optických prvků

Všechny vzorky LED i optických prvků byly stanoveny jako symetrické podle rovin *C0-C180* a *C90-C270*. Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, mezivýsledkem byly data polorovin *C0* až *C90* po 15° a každá polorovina byla měřena v úhlech $\gamma = (0 - 100)^\circ$ po kroku $\Delta\gamma = 5^\circ$. Podle CIE 1931 je standardní pozorovací (měřený) úhel 2° . Měření však bylo prováděno ručně a z hlediska časové náročnosti byl zvolen krok úhlu 5° .

Díky tomu může dojít ke zkreslení výsledné křivky svítivosti a dalších měřených či počítaných parametrů. Velmi značně je zkreslen model svítivosti soustavy s optickým prvkem FCA100328, který má velmi úzký vyzařovací úhel. Naměřená data sousedních bodů v úhlu 5° byla aproximována (interpolována) přímkou a díky tomu nemusely být zaznamenány skutečné maximální hodnoty nebo velmi strmé prostorové změny svítivosti. Je třeba počítat s touto chybou při hodnocení optických prvků.

Je důležité rozlišovat parametry zjištěné při bodovém měření s goniofotometrem a parametry naměřené v kulovém integrátoru. Měřením v kulovém integrátoru se dozvíme celkový světelný tok a celkovou teplotu chromatičnosti zatímco při bodovém měření se jedná jen o světelný tok, svítivost, či teplotu chromatičnosti v bodě fotometrické plochy. Celkový světelný tok pak lze zjistit výpočetní metodou zonálních toků.

6.2 Křivky svítivosti

Vyhodnocení křivek svítivosti bude probíhat na základě grafických výsledků dostupných v *Přílohách A-1, A-2 a A-3*. Křivky svítivosti byly zpracovány ve 2D a 3D modelu pro LED XP-E, XP-G, XT-E a v soustavách s optickými prvky.

6.2.1 Vyhodnocení křivek svítivosti optických prvků

Dle výsledků můžeme tvrdit, že křivky svítivosti LED XP-E, XP-G a XT-E jsou symetrické podle polorovin *C0* a *C90* se zanedbáním menších odchylek. U LED XP-E se záření světla blíží kulovému tvaru, u LED XP-G je záření mírně zploštělé podle osy $\gamma = 0^\circ$ a u LED XT-E se tvar záření blíží elipse s osou $\gamma = 0^\circ$.

Měřené optické prvky C10757, C10924, C10966, C11185, CA10823, CA10927, CA10932 a CA11256 jsou různou variací na čočku, zatímco prvky FA10343, FA10665, FA10708, FCA10306, FCA10328 jsou soustavou s refraktorem a velmi pravděpodobně se jedná o TIR optické prvky. Výrobce však tuto informaci v datasheetu optik FA a FCA přímo neuvádí. Čočky si označíme za skupinu 1 a soustavy s refraktorem za skupinu 2 optických prvků.

Se zanedbáním menších odchylek jsou křivky svítivosti optických prvků C10966, FA10343, FA10665, FA10708 a FCA10328 symetrické podle rovin *C0-C180* a *C90-C270*. Symetričnost převažuje především u optických soustav s refraktorem. Ostatní optické prvky mají křivky svítivosti symetrické jen podle roviny *C0-C180*.

Vliv na tvar křivky svítivosti světelné soustavy má především optický prvek, avšak částečně se na výsledku podílí i vyzařovací charakteristika LED. Každá optika vytvořila specifické vyzařovací charakteristiky. Pro reálnou představu byly vytvořeny 3D modely křivek svítivosti dostupné v *Přílohách A-1, A-2 a A-3*.

6.2.2 Účinnost optických prvků

V této kapitole budeme hodnotit účinnost optických prvků, tj. zjistíme, kolik světla projde optickým prvkem. Hodnotit a srovnávat se bude dle naměřených výsledků z *Přílohy E-3* při proudu $I = 0,1$ A. V tabulce (*Přílohy E-3*) jsou dostupné vypočítané a výrobcem prezentované účinnosti optických prvků (účinnosti od výrobce jsou dostupné také v *Příloze J-1*).

Vypočítané účinnosti optických prvků při proudu $I = 1$ A jsou pro nás jen orientační. K výsledku se dospělo mnoha korekcemi, zjednodušeními, úpravami a výsledek je tak zatížen velkou chybou, proto se těmito hodnotami dále zabývat nebudeme.

Skupina 1 optických prvků, tj. čočky, má dle výrobce udávanou účinnost téměř stejnou a to v rozsahu (92 – 93) %. Vypočítané účinnosti jsou napříč spektrem vzorků převážně nižší, než udávané výrobcem. To je zřejmě dáno tím, že při měření s krokem úhlu $\gamma = 5^\circ$ nebyl změřen všechny světelný tok vystupující z optického prvku. Výrobce také neudává, zda účinnosti optických prvků byly určeny na základě měření (např. v ideálním prostředí pomocí profesionálních přístrojů) nebo jsou výsledkem výpočtu pomocí softwaru s matematicko-fyzikálním modelem optického prvku.

Skupina 2 optických prvků s refraktorem (popř. difuzorem) má účinnost výrazně nižší. Podle dat výrobce se účinnost u těchto prvků pohybuje v rozsahu (77 – 83) %. U optických prvků FA10343 a FCA10328 účinnosti výrobce neudává.

Z pohledu použitých typů LED jsou zaznamenány nejnižší účinnosti při použití LED XT-E. Jedná se však o pokles v řádu jednotek procent oproti účinnostem udávaným výrobcem. Účinnosti optických prvků s LED XP-E a XP-G jsou o jednotky procent vyšší vzhledem k LED XT-E a blíží hodnotám udávaným výrobcem, ale není to pravidlem u všech optických prvků.

Nejnižší účinnost byla zaznamenána s optickým prvkem FA10343 (64,32 – 67,32) % v závislosti na použitém typu LED a nejvyšší účinnost u prvků C10757 (87,33 – 93,44) %. Nejvyšší účinnost vzhledem k výrobci a k typu LED vykazovaly optické prvky C10966 (90,77 – 92,35) %, FA10665 (81,69 – 83,3) % a FCA10306 (78,87 – 80,84) %.

U optických prvků FA10343 byla zjištěna účinnost v rozsahu (64,32 – 67,32) % a u prvku FCA10328 (79,89 – 87,66) %.

Důležitým poznatkem je, že účinnost optického prvku závisí nejen na něm samotném (typ optiky, materiál), ale i na typu LED.

6.2.3 Vyzařovací úhel optických prvků

Vyzařovací úhly optických prvků definované výrobcem dle standardu FWHM (více v kapitole 3.2.2.1) jsou dostupné v *Příloze J-1*. Výrobce definuje úhel FWHM v datasheetu LED XP-E 115° , XP-G 125° a XT-E 115° .

V případě křivek svítivosti optického prvku CA10823 (polární graf je dostupný v *Příloze A-1, A-2 a A-3*) je v rovině C0-C180 distribuován světelný tok do stran (tj. v ose $\gamma = 0^\circ$ není maximum) a v rovině C90-C270 je maximum v ose $\gamma = 0^\circ$. Znamená to tedy, že v rovině C0-C180 je velký vyzařovací úhel a v rovině C90-C270 naopak nízký. Proto výrobce v tomto případě uvádí úhel FWHM pro obě roviny. Například pro optický prvek CA10823 výrobce uvádí úhel FWHM $68+136^\circ$. První číslo udává vyzařovací úhel v rovině C90-C270 a druhé číslo

v rovině *C0-C180*. Roviny mohou být i prohozeny, záleží na tom, jakou zvolíme výchozí pozici pro měřenou optickou soustavu.

Vyzařovací úhly FWHM definované výrobcem se ověřily pouze pohledem na grafy křivek svítivosti. S jistou tolerancí lze konstatovat, že úhly FWHM definované výrobcem souhlasí s našimi naměřenými daty. Srovnáním všech grafů křivek svítivosti se došlo k závěru, že úhel FWHM je ovlivňován použitým zdrojem LED, a to v řádu jednotek stupňů.

6.2.4 Hodnota cd/lm optických prvků

Dále budeme porovnávat špičkové hodnoty cd/lm neboli výšku křivek svítivosti. Tabulka s přehledem maximálních hodnot cd/lm optických prvků je dostupná v *Příloze J-1*. Součástí přílohy jsou rovněž hodnoty cd/lm udávané výrobcem. Avšak výrobce při měření některých optických prvků použil LED XR-E, která má jiný vyzařovací úhel a také odlišné parametry vzhledem k našim vzorkům LED, proto jsou tyto data pro nás irelevantní.

Nejvyšší hodnoty cd/lm byly zjištěny u vzorků optických prvků 2 a 9 – 14, což je většina optických soustav TIR s refraktorem. TIR optika formuje světelný kužel s malým vyzařovacím úhlem. S užším vyzařovacím úhlem vzrůstá hodnota cd/lm. Tento výrok lze snadno prezentovat na optickém prvku FCA10328. Ten má nejmenší vyzařovací úhel 12° ze všech měřených vzorků a nejvyšší hodnoty cd/lm s LED XP-E 7,38 cd/lm, s XP-G 6,34 cd/lm a s XT-E 4,57 cd/lm.

Hodnoty cd/lm nejsou stejné pro všechny vzorky LED. Nejvyšší hodnoty vykazují optické soustavy s LED XP-E. Hodnoty XP-G a XT-E jsou srovnatelné. Jsou zde výjimky, takže to nelze považovat za pravidlo a navíc s užším vyzařovacím úhlem roste difference mezi hodnotami cd/lm u LED XP-G a XT-E.

6.3 Vliv optického prvku na teplotu chromatičnosti LED

Dosud jsme hodnotili optické prvky podle obecných zavedených parametrů používaných výrobcí a odbornou veřejností (účinnost, vyzařovací úhel, hodnota cd/lm). Pojďme nyní studovat vliv optického prvku na barevné vlastnosti světla. Budeme se zabývat teplotou chromatičnosti (CT), která je úzce spjata se spektrálním složením světelného zdroje LED.

CT byla zaznamenávána při měření spolu s ostatními parametry. Velmi náročnou úlohou bylo zpracování těchto dat. V oblastech s nízkou svítivostí CT nebyly „stabilní“ a musely být vyjmuty z hodnocení. Program AvaSoft zaznamenával nepřesné hodnoty v oblastech s nízkou svítivostí, které vzrůstaly do vysokých hodnot. Pravděpodobně docházelo k ovlivňování měření od svitu z monitoru. Do hodnocení se především zahrnuly data v rozsahu vyzařovacího úhlu FWHM a zbytek „stabilních“ dat, která byla vyhodnocena jako přijatelná.

Jak bylo řečeno, úprava byla velmi časově náročná. Pro hodnocení byla vybrána data vzorků LED a optických prvků C11185, CA11256, FA10708, které byly zvoleny jako zástupci ostatních optických prvků na základě podobnosti tvaru křivek svítivosti. Grafické průběhy CT jsou dostupné v *Příloze G-1, G-2 a G-3*.

Výrobce LED XP-E označuje jako „studenou bílou“ s rozsahem CT 5000 – 10000 K, XP-G také „studenou bílou“ s teplotami 5000 – 8300 K a XT-E jako „neutrální bílou“ s teplotami 3700 – 5000 K. Naměřené hodnoty LED XP-E jsou přibližně v rozsahu 4900 – 6300 K, u XP-G v rozsahu 6000 – 9500 K a u XT-E v rozsahu 4050 – 4190 K. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny v optické ose LED (shodná s mechanickou), tj. v úhlu $\gamma = 0^\circ$. Je nutné podotknout, že naměřené hodnoty CT LED XP-E a XP-G přesáhly rozsah CT udávaný výrobcem. Je ale nutné uvést na

pravou míru systém hodnocení. Zatímco výrobce zahrnul do hodnocení data CT jen v rozsahu úhlu FWHM, v našem případě se do hodnocení zahrnuly i „stabilní“ data. V každém případě LED XP-G rozsah CT od výrobce překračuje.

CT vzorků LED vykazují symetrii podle rovin $C0-C180$ a $C90-C270$ a v případě XP-E lze hovořit o konstantní teplotě chromatičnosti v prostoru vyzařovacího úhlu. Obecně u všech vzorků LED klesá teplota chromatičnosti od osy $\gamma = 0^\circ$.

Průběh CT čočky C11185 kopíruje průběh CT LED. S XP-E je rozsah CT 5050 – 5800 K s XP-G 6000 – 8000 K a s XT-E 4100 – 4300 K. V blízkosti úhlu $\gamma = 0^\circ$ je průběh symetrický a ve vyšších úhlech je zjištěna závislost mezi CT a křivkami svítivosti. Znamená to, že s vyšší svítivostí klesá CT a naopak při nižší svítivosti se CT zvyšuje.

U čočky CA11256 byly naměřeny následující CT. S XP-E je rozsah 5250 – 6000 K, s XP-G 6250 – 8500 K a s XT-E 3980 – 4230 K. U LED XP-E a XP-G není zaznamenán žádný vztah mezi křivkami svítivosti a CT. Průběh CT optiky opět kopíruje průběh CT LED. V oblasti nejvyšší svítivosti dochází u LED XP-E k nárůstu teploty chromatičnosti.

Optický prvek FA10708 je TIR optika s refraktorem a její vyzařovací úhel je 31° . V tomto úhlu byly naměřeny následující teploty chromatičnosti. S XP-E je rozsah 5480 – 5950 K, s XP-G 7100 – 7600 K a s XT-E 4100 – 4300 K. Při použití LED XP-G a XT-E je průběh CT symetrický. S LED XP-E dochází od roviny $C60-C240$ k poklesu CT. Pokles byl zaznamenán jen v úhlech $\gamma = (5 - 20)^\circ$.

V tabulce Tab. 6-1 je přehled všech zjištěných teplot chromatičností, naměřených i udávaných výrobcem. Nejvyšší CT byla naměřena u LED XP-G, dále u XP-E a nejnižší u XT-E. Naměřený rozsah CT XP-G překračuje horní hranici CT, udávanou výrobcem, až o 1200 K. V každém případě optický prvek má vliv na CT LED a způsobí snížení horního rozsahu CT. Každý hodnocený vzorek působí odlišně na teplotu chromatičnosti.

Tab. 6-1 Přehled naměřených teplot chromatičností (CT) a udávaných výrobcem (LED CREE jsou CT od výrobce, LED LAB jsou naměřená v laboratoři)

Vzorek	CT [K]					
	XP-E		XP-G		XT-E	
	min	max	min	max	min	max
LED CREE	5000	10000	5000	8300	3700	5000
LED LAB	4900	6300	6000	9500	4050	4190
C10757	5250	5620	7000	8000	3950	4270
C10924	5400	5880	7200	7880	4070	4400
C10966	5150	6050	6500	9000	4070	4170
C11185	5050	5800	6000	8000	4100	4300
CA10823	5500	6100	6800	9000	3850	4300
CA10927	5200	5750	6900	8100	3950	4220
CA10932	5000	6500	6000	9000	4000	5000
CA11256	5250	6000	6250	8500	3980	4230
FA10343	5300	6000	6600	9000	4040	4110
FA10665	5500	6000	6700	7800	4020	4230
FA10708	5480	5950	7100	7600	4100	4300
FCA10306	5600	5950	7350	7600	4000	4350
FCA10328	5500	5940	7100	8000	4060	4160

6.4 Vliv optického prvku na spektrální průběh LED

Nejprve přistoupíme k popisu spektrálních průběhů LED, které jsou dostupné v *Přílohách H1 až H12*. Spektrum je symetrické podle rovin *C0-C180* a *C90-C270* pro všechny tři vzorky LED. Spektrální průběh LED XP-E má první maximum o výkonu $46 \mu\text{W}$ v oblasti vlnové délky 450 nm a druhé maximum o výkonu $24 \mu\text{W}$ v oblasti 550 nm. Spektrální průběh LED XP-G má první maximum o výkonu $52 \mu\text{W}$ v oblasti vlnové délky 445 nm a druhé maximum o výkonu $21 \mu\text{W}$ v oblasti 540 nm. Spektrální průběh LED XT-E má první maximum o výkonu $27,5 \mu\text{W}$ v oblasti vlnové délky 455 nm a druhé maximum o výkonu $24,5 \mu\text{W}$ v oblasti 580 nm. Rozdíl výkonů mezi prvním a druhým maximem se s rostoucím úhlem γ snižuje a dochází tak ke snižování teploty chromatičnosti.

LED XP-G má maxima s vyššími výkony a jsou oproti XP-E posunuta k nižším vlnovým délkám. Obě LED XP-E a XP-G vyzařují „studené“ světlo, avšak XP-G dosahuje vyšší teploty chromatičnosti. LED XT-E má maxima posunuta k delším vlnovým délkám a navíc mezi oběma maximy není takový výkonový propad. Proto XT-E bude mít mnohonásobně nižší teplotu chromatičnosti a světlo bude „neutrální“.

V *Příloze H2, H6 a H10* jsou spektrální průběhy čočky C11185. Jelikož spektrální průběh čočky C11185 již není symetrický, jako u LED, byly zpracovány grafy pro všechny roviny *C0-C180* až *C90-C270*.

V *Příloze H3, H7 a H11* jsou spektrální průběhy čočky CA11256. Spektrální průběh čočky C11185 také není symetrický.

V *Příloze H4, H8 a H12* jsou spektrální průběhy TIR optiky s refraktorem FA10708. Spektrální průběh optického prvku FA10708 je symetrický jako u LED.

Teplota chromatičnosti hodnocená v předchozí kapitole je výsledkem složení spektrálního průběhu. Je rovněž závislá na výkonu každé vlnové délky (ve viditelném spektru). Nejvíce je však ovlivněna polohou maxim ve spektrálním průběhu. Výše maxima spektrálního průběhu se mění shodně s křivkami svítivosti.

U čoček je důležité neopomenout index lomu, který se s rostoucí vlnovou délkou snižuje. V materiálu čočky může také docházet k absorpci určitých vlnových délek.

7 OPTICKÁ SOUSTAVA LED S OPTICKÝM PRVKEM

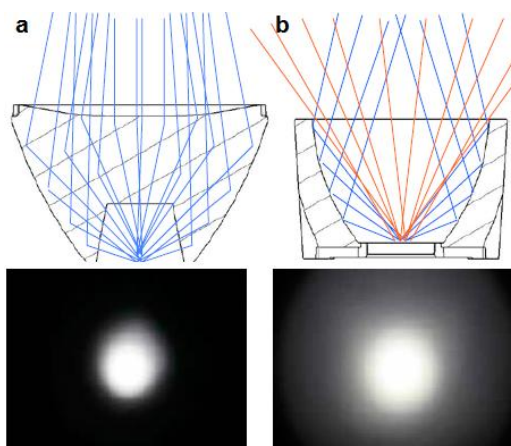
7.1 Využití optických prvků

V současnosti je trendem aplikovat LED místo původních světelných zdrojů. LED se využívají v průmyslu, v dopravě, nemocnicích, k bezpečnostnímu osvětlení, využití je rovněž v architektonickém osvětlování, v domácnostech apod. Podrobnější výpis užití LED je dostupný v [42].

Světelné diody jsou bodové zdroje s křivkou svítivosti podobnou difuznímu zářiči. [32] Toto prostorové rozložení světelného toku není vhodné pro každou aplikaci a proto se užívá optických modulů k úpravě křivek svítivosti.

Korejská firma AnyCasting rozděluje optické moduly pro vnitřní a venkovní užití. Pro vnitřní užití jsou v nabídce „normální“ optické moduly s jedním nebo více poli čoček a rotačně symetrickou plochou svítivosti. Čočky mohou být sférické nebo asférické (nemají kulově zakřivenou plochu). Vyzařovací úhel FWHM je v rozsahu $(30 - 60)^\circ$. Úhly FWHM jsou dány na základě požadavku zákazníka, takže uvedený rozsah je relativní a je výrobní záležitostí. Normální optické moduly se používají v domácnostech jako hlavní nebo doplňkové osvětlení, v levnějších svítidlách apod. [39][41]

Dále jsou k dispozici moduly pro výkonové LED, tzv. TIR čočky, které využívají úplného vnitřního odrazu. Na Obr. 7-1 je zobrazen princip TIR optiky a rozdíl mezi reflektorem. Obrázek a) zobrazuje TIR optiku. Paprsky se odráží od vnitřní stěny (modrá barva). Součástí obrázku je fotografie distribuce světelného toku. U reflektoru dochází nejen k odrazu (modré paprsky), ale i k přímému vyzařování (oranžové paprsky). Reflektor tak díky přímému vyzařování produkuje okolní světlo s nižší intenzitou. U obou optických modulů je deklarovaný stejný vyzařovací úhel. TIR čočky jsou převážně číré, jednočipové s vyřazovacím úhlem FWHM $(7 - 75)^\circ$. Vyrábí se v různých kategoriích a mohou být doplněny refraktorem. Používají se ve fabrikách, tunelech, k osvětlování sportovišť, vody, fontán apod. [39][43][44]



Obr. 7-1 Princip TIR optického modulu (a) a reflektoru (b); modrý paprsek je odražený nebo lomený, oranžový paprsek je přímý [44]

Ve venkovním prostředí se optické moduly využívají v dopravě k osvětlení komunikací, pěší zóny, cyklostezek, k architektonickému osvětlování, popř. k bezpečnostnímu osvětlování objektů.

Pro tyto účely jsou vhodné optické moduly s asymetrickou plochou svítivosti. V případě optik pro osvětlení ulic je vhodné, pokud výrobce (prodejce) uvádí jako doplňkovou informaci graf osvětlenosti (hodnoty osvětlenosti na srovnávací rovině ve vzdálenosti např. 1, 2, 3, 4 a 5 m od světelné soustavy) popřípadě izoluxní graf. [39]

Optiky TIR lze dále řadit do kategorií dle typického úhlu FWHM, výšky křivky svítivosti cd/lm a oslnění ve zvoleném úhlu. Velmi názorná ukázka je v katalogových listech firmy LEDIL dostupná v [44].

Nesmíme opomenout speciální optické moduly vyrobené k účelovému použití, které lze aplikovat v automobilech, ve fotovoltaiice, na moři (lodě, maják) apod. [39]

Pro osvětlení veřejných prostor jsou vydány nejruznější nařízení a normy, které definují minimální osvětlenost, rovnoměrnost osvětlení, index barevného podání, teploty chromatičnosti, omezené oslnění apod. Jako příklad můžeme uvést normu ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení pracovních prostorů. Z těchto důvodů lze optické moduly hodnotit dle rovnoměrnosti osvětlení. Čiré čočky jsou orientovány na vyšší účinnosti a osvětlenosti. Další skupinou jsou čočky, které vykazují jistou rovnoměrnost osvětlení, ale dochází u nich ke chromatické aberaci. Jedná se v podstatě o chromatickou vadu, která způsobuje, že index lomu je na vlnových délkách rozdílný. Nej kvalitnější sorta optických modulů vykazuje vysokou rovnoměrnost osvětlení. [39]

Výše popsaná kategorizace optických modulů dle aplikace je pouze ilustrativní. Záleží na výrobcí (distributorovi) jak moc vyjde vstříc zákazníkovi a usnadní mu orientaci v nabízených produktech.

7.2 Volba vhodné kombinace LED a optického prvku

7.2.1 Dle požadavku zákazníka

Optické prvky se navrhují podle typu LED. LED mají různý rozsah teplot chromatičnosti, velikost a pozici čipu. Tyto parametry LED ovlivňují výsledné charakteristiky optických prvků, tj. rozložení teploty chromatičnosti v prostoru, rozložení svítivosti, účinnost apod. Nejvíce je patrná změna vyzařovacího úhlu FWHM. Proto výrobce k optickým prvkům doporučuje adekvátní typ LED pro zachování deklarovaných parametrů optického prvku.

Volba vhodné kombinace LED a optického prvku je závislá na mnoha faktorech, které si v následujících řádcích popíšeme. Jako první zvolíme typ LED, kterou vybíráme v katalogových listech na základě fotometrických parametrů: světelného toku, vyzařovacího úhlu, teploty chromatičnosti, indexu barevného podání a barvy vyzařovaného světla (modrá, červená, zelená, purpurová, ale můžeme vzít v potaz i parametry elektrické a tepelné: jmenovité napětí, doporučený stabilizovaný proud, příkon, maximální a provozní teplota, tepelné ztráty.

S volbou LED souvisí také prostory, ve kterých bude použita. Jedná se o prostředí vnitřní a vnější (venkovní). Na základě těchto prostor volíme doporučenou teplotu chromatičnosti a index barevného podání LED. Přehled doporučených nebo požadovaných teplot chromatičností na základě osvětlovaných prostor je dostupný např. v [46]. Obecně se jedná o velmi individuální přístup k volbě. Z hlediska působení barev na psychiku člověka se pro pracovní prostředí volí studenější tóny a pro odpočinek tóny teplejší.

V tomto bodě je vhodné uvážit typ optického prvku, zda je vhodný do vnitřního nebo venkovního prostředí, rovnoměrnost osvětlení, vyzařovací úhel, účinnost nebo i vrcholovou

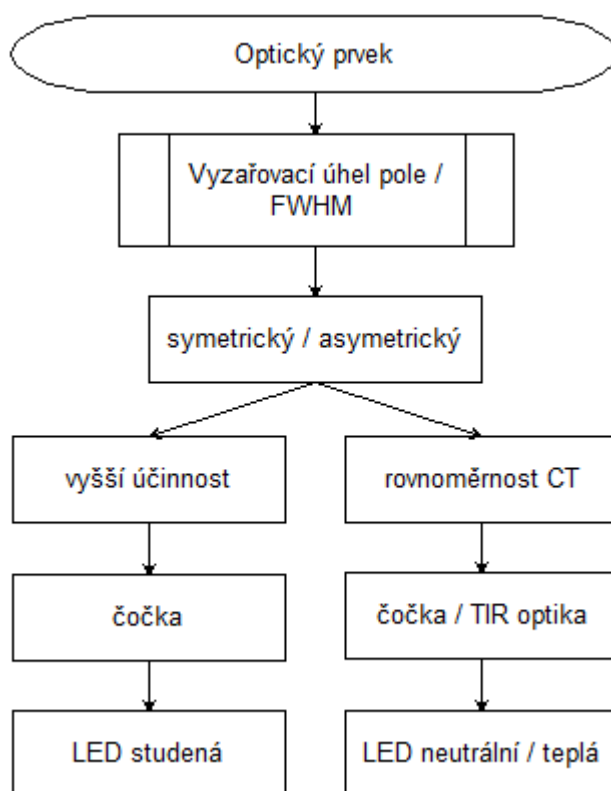
hodnotu cd/lm. Se znalostí světelného toku LED a vrcholové hodnoty cd/lm optického prvku, lze vypočítat svítivost v ose a následně intenzitu osvětlení ve zvolené vzdálenosti. [45]

7.2.2 Na základě naměřených dat optických prvků

Konečný tvar křivek svítivosti závisí na optickém prvku, který se volí s ohledem na požadované charakteristiky. Může to být volba optického prvku na základě užití (vnitřní nebo venkovní; více v kapitole 7.1 Využití optických prvků).

V prvním kroku zvolíme na základě užití vyzařovací úhel. Dále určíme, zda bude mít optický prvek fotometrickou plochu svítivosti symetrickou nebo asymetrickou. Symetrickou plochu svítivosti mají všechny měřené vzorky TIR optických prvků. Dosahují vysokých hodnot cd/lm díky ostrému vyzařovacímu úhlu. Nevýhodou je nižší účinnost.

Dále se bude návrh orientovat na vyšší účinnost nebo rovnoměrnost CT optické soustavy. Vyšší účinnosti optické soustavy je dosaženo při použití klasických čoček a studených LED. Rovnoměrnosti CT lze dosáhnout za použití čočky i TIR optiky. Rovnoměrnost je ale způsobena neutrální LED, která má velmi rovnoměrný průběh teploty chromatičnosti. Platí tedy pravidlo, že s rovnoměrnějším průběhem CT LED je i rovnoměrnější průběh CT optické soustavy.



Obr. 7-2 Volba nejvhodnější kombinace optického prvku a LED

7.2.3 Třídění optických prvků

Třídění technických svítidel dostupná v knize Světlo a osvětlování (kapitola 14.2) [32]. Tento postup je optimalizován pro svítidla, ale pokusíme se aplikovat klasifikaci na optické prvky.

Optické prvky lze rozdělit do kategorií dle použití pro všeobecné, uliční a směrové osvětlování. [32]

Optické prvky pro všeobecné osvětlování klasifikujeme na základě pásmových toků nebo fotometrické plochy svítivosti (křivky svítivosti). Rozdělení dle pásmového toku je v *Tab. 7-1*. Na základě technologie LED lze optické prvky klasifikovat jen jako přímé. Z hlediska aplikace pak jako přímé nebo nepřímé. Tohoto rozdělení využívá německý systém klasifikace svítidel pro všeobecné osvětlování (*Tab. 14.2* v [32]). Svítidlo je označeno písmenem a dvěma číslicemi. Písmeno vychází z rozdělení pásmového toku. První číslice udává podíl světelného toku do dolního poloprostoru dopadající na srovnávací rovinu a druhá číslice podíl světelného toku do horního poloprostoru dopadající na strop. [32] Podle německého systému klasifikace lze optické prvky označit A61 v aplikaci přímého osvětlení a v aplikaci nepřímého E14.

Tab. 7-1 Rozdělení svítidel podle rozložení světelného toku [48]

Označení svítidla	Světelný tok do dolního poloprostoru (%)	Světelný tok do horního poloprostoru (%)	Značení podle DIN 5040
přímé	90 až 100	0 až 10	A
převážně přímé	60 až 90	10 až 40	B
smíšené	40 až 60	40 až 60	C
převážně nepřímé	10 až 40	60 až 90	D
nepřímé	0 až 10	90 až 100	E

Druhý systém třídění optických prvků pro všeobecné osvětlování využívá znalost tvaru fotometrické plochy. Jednou z možností je klasifikace optických prvků podle činitele tvaru křivky (*Tab. 7-2*), který se určí výpočtem. V našem případě proběhla klasifikace podle úhlového pásma maximální svítivosti a dle přibližného zobrazení křivek svítivosti (*Obr. 7-3*) z důvodu urychlení procesu. [32]

Tab. 7-2 Rozdělení svítidel podle činitele tvaru křivky svítivosti [48]

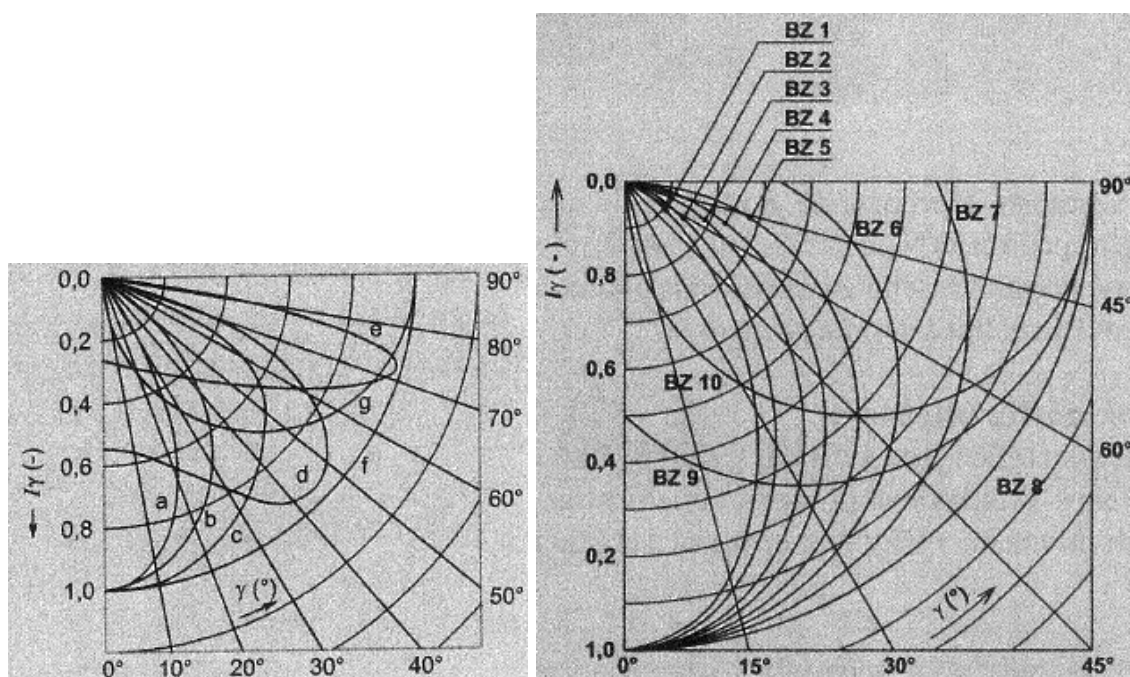
Tvar křivky svítivosti		Úhlové pásmo maximální svítivosti [°]	Činitel tvaru křivky svítivosti
označení	název		
a	koncentrovaná	0 až 15	$K_F \geq 3$
b	hluboká	0 až 30, 150 až 180	$2 \leq K_F < 3$
c	kosinusová	0 až 35, 145 až 180	$1,3 \leq K_F < 2$
d	pološiroká	35 až 55, 125 až 145	$1,3 \leq K_F$
e	široká	55 až 85, 95 až 125	$1,3 \leq K_F$
f	rovnoměrná	0 až 180	$K_F \leq 1,3$, přičemž $I_{\min} > 0,7 I_{\max}$
g	sinusová	70 až 90, 90 až 110	$1,3 < K_F$, přičemž $I_{\min} < 0,7 I_{\max}$

Další možností je klasifikační systém BZ křivek, zobrazený v *Tab. 7-3*. Tento systém je složitější. V některých případech se obtížně stanovuje klasifikační třída. Hodnocení bylo opět provedeno dle vyobrazení tvaru BZ křivek (*Obr. 7-3*). [32]

Tab. 7-3 Klasifikace svítidel podle BZ křivek [48]

Označení	Tvar křivky svítivosti
BZ 1	$I_\gamma = I_0 \cos^4 \gamma$
BZ 2	$I_\gamma = I_0 \cos^3 \gamma$
BZ 3	$I_\gamma = I_0 \cos^2 \gamma$
BZ 4	$I_\gamma = I_0 \cos^{1,5} \gamma$
BZ 5	$I_\gamma = I_0 \cos \gamma$
BZ 6	$I_\gamma = I_0 (1 + 2 \cos \gamma)$
BZ 7	$I_\gamma = I_0 (2 + \cos \gamma)$
BZ 8	$I_\gamma = \text{konst.}$
BZ 9	$I_\gamma = I_0 (1 + \sin \gamma)$
BZ 10	$I_\gamma = I_0 \sin \gamma$

Svítidla se dále dělí na dolnozářiče, hornozářiče, hlubokozářiče a širokozářiče. Dolnozářiče vyzařují světelný tok do dolního poloprostoru. Jedná se o přímé bodové svítidlo s rotačně souměrnou plochou svítivosti. Křivky dle činitele tvaru jsou v rozsahu od koncentrovaných po široké. Hornozářič vyzařuje světelný tok do horního poloprostoru. Slouží pro nepřímé osvětlení prostoru. Pro tyto účely se užívá asymetrického optického systému. Hlubokozářiče slouží pro osvětlení halových prostor s montážní výškou 7 m. Křivky dle činitele tvaru jsou v rozsahu od koncentrovaných po široké. Zde se uplatní výkonové LED a TIR optiky. Širokozářiče mají podobné uplatnění jako hlubokozářiče, ale zde je montážní výška pod 7 m. Křivky dle činitele tvaru jsou v rozsahu od pološirokých po široké. [32]



Obr. 7-3 Klasifikace podle činitele tvaru křivky (vlevo) a podle BZ křivek (vpravo) [32]

Pro uliční svítidla platí zvláštní klasifikace. Uliční svítidlo osvětluje vymezený prostor komunikace, chodníku apod. Pro klasifikaci je nutné znát tvar fotometrické plochy svítivosti

v podélném směru (Tab. 7-4) s komunikací (C0-C180), tvar fotometrické plochy svítivosti v příčném směru (Tab. 7-5) na komunikaci (C90-C270) a ověření tvaru fotometrické plochy svítivosti nad směrem maximální svítivosti. Na základě těchto parametrů lze navrhnout rozteče mezi svítidly při dané výšce. Také lze určit, v jaké šíři bude komunikace osvětlena. [32]

Tab. 7-4 Klasifikace uličních svítidel podle tvaru fotometrické plochy v podélném směru [32]

Podélný rozsah	Úhel středu světelného svazku
	klasifikace CIE
krátký	$\gamma < 60^\circ$
střední	$60^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$
dlouhý	$\gamma > 70^\circ$

Tab. 7-5 Klasifikace uličních svítidel podle tvaru fotometrické plochy v příčném směru [32]

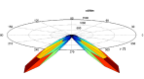
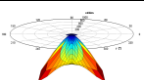
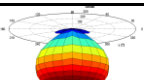
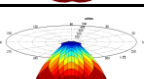
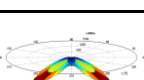
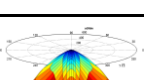
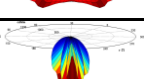
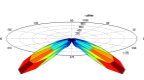
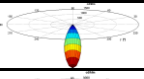
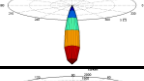
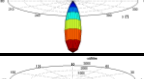
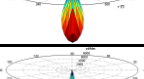
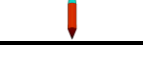
Křivka svítivosti	Klasifikace CIE	
	Příčný rozsah	Úhel hranice svazku
symetrická	-	-
asymetrická	úzký	$\gamma < 45^\circ$
	střední	$45^\circ \leq \gamma \leq 55^\circ$
	široký	$\gamma > 55^\circ$

Svítidla pro směrové osvětlování lze klasifikovat podle tvaru světelné stopy na srovnávací rovině na rotačně souměrná (A), souměrná podle dvou kolmých rovin (B), souměrná podle jedné roviny (C) a nesouměrná (D). Další způsob kvalifikace vychází ze šířky svazku. [32]

Nyní se pokusíme na základě těchto informací klasifikovat optické prvky. Tím se zabývá tabulka Tab. 7-6. U každé optiky je uveden 3D model svítivosti. Dále je klasifikace orientována dle aplikace pro všeobecné osvětlování, uliční osvětlování a směrové osvětlování. Optické prvky pro všeobecné osvětlování jsou klasifikovány podle činitele tvaru křivky, BZ křivky, tvaru křivky (rozumí se symetrická nebo asymetrická) a typu zářiče. První parametr uličních optik je vhodnost použití. Například optiky C10757 a CA11256 nejsou vhodné pro uliční osvětlení, protože v příčné rovině C90-C270 jsou svítivosti velmi nízké. Další klasifikace optik pro uliční osvětlení je dle podélného a příčného rozsahu fotometrické plochy. Třetí možností je využití optických prvků pro směrové osvětlování. Opět posuzujeme vhodnost pro tuto aplikaci. Pro směrové osvětlování se používají optiky se symetrickou i asymetrickou plochou svítivosti. Uplatnění zde nacházejí TIR optiky FA a FCA s rotačně symetrickou plochou svítivosti a ostrým vyzařovacím úhlem. Nicméně lze použít i některé čočky. Další klasifikace je podle tvaru světelné stopy na srovnávací rovině (viz předchozí odstavec). Používá se také třídění podle šířky svazku svítivosti.

Pokud jsme již vybrali nejvhodnější optický prvek, zbývá zvolit správný typ LED. Světelný zdroj LED volíme na základě světelného toku, měrného výkonu, vyzařovacího úhlu, barvy světla, teploty chromatičnosti, indexu barevného podání, a také dle napájecího napětí a proudu atd. Výrobce k optickým prvkům doporučuje vhodné LED. Pro naše účely zcela vyhovuje volba z doporučených LED od výrobce dle světelného toku, vyzařovacího úhlu a teploty chromatičnosti.

Tab. 7-6 Klasifikace optických prvků podle literatury v [32]

Číslo	OPTIKA	3D model svítivosti	Všeobecné použití				Uliční optiky			Směrové osvětlování		LED
			Činitel tvaru křivky	BZ křivky	Tvar křivky	Typ zářiče	Použití	Podélný rozsah	Příčný rozsah	Použití	Světelná stopa	
1	C10757		e	BZ9, BZ5	A	hornozářič, hlubokozářič, širokozářič	-	-	-	-	B	XP-E, XP-G, XT-E
2	C10924		d	BZ4	A	hornozářič, hlubokozářič, širokozářič	✓	krátký	úzký	✓	B	
3	C10966		c	BZ5	S	dolnozářič, hlubokozářič	✓	krátký	-	✓	A	
4	C11185		d	BZ5	A	hornozářič, hlubokozářič, širokozářič	✓	krátký	úzký	✓	B	
5	CA10823		e	BZ9, BZ5	A	hornozářič, hlubokozářič, širokozářič	✓	krátký	úzký	-	B	
6	CA10927		d	BZ5	A	hornozářič, hlubokozářič, širokozářič	✓	krátký	úzký	✓	B	
7	CA10932		b	BZ5	A	hlubokozářič	-	-	-	✓	B	
8	CA11256		e	BZ9, BZ5	A	hornozářič, hlubokozářič, širokozářič	-	-	-	-	B	
9	FA10345		a	BZ1	S	dolnozářič, hlubokozářič	-	-	-	✓	A	
10	FA10665		a	BZ1	S	dolnozářič, hlubokozářič	-	-	-	✓	A	
11	FA10708		a	BZ1	S	dolnozářič, hlubokozářič	-	-	-	✓	A	
12	FCA10306		a	BZ1	A	hlubokozářič	-	-	-	✓	B	
13	FCA10328		a	BZ1	S	dolnozářič, hlubokozářič	-	-	-	✓	A	

8 ZÁVĚR

První část diplomové práce se zabývá teoretickými základy fotometrických veličin používanými ve světelné technice. Tato teorie je nezbytná znalost pro měření fotometrických veličin v laboratoři. Předpokládá se, že odborná veřejnost a specialisti na světelnou techniku tuto tematiku mají nastudovanou. Ostatním zájemcům lze doporučit odbornou literaturu o světle a světelné technice.

Pro naši práci jsou nejdůležitější poznatky o metodě měření křivek svítivosti a výpočtu celkového světelného toku z křivek svítivosti metodou zonálních toků (kapitola 2.2). Dále je vhodné se řídit směrnici CIE 127:2007 popisující doporučené postupy při měření LED (kapitola 4).

Kapitola 3 obsahuje krátký úvod do tematiky optických prvků pro LED a je zaměřena na vzorky optických prvků, které se budou hodnotit. V kapitole je výčet základních optických prvků používaných ve světelné technice. Další podkapitoly se věnují parametrům charakterizující optické prvky, tj. účinnost, vyzařovací úhel, výška křivky svítivosti cd/lm a archivování naměřených dat ve formátu EULUMDAT.

Další část diplomové práce obsahuje návrh goniofotometru, upínacího systému LED, popis pracoviště a přístrojů pro měření. Před samotným měřením v programu AvaSoft bylo nutné provést kalibraci. V kapitole 5 je také velmi podrobně popsán postup měření a následné zpracování v programech MS Excel, Matlab a další.

Závěrečná část diplomové práce (kapitola 7) se zabývá vyhodnocením naměřených a zpracovaných dat. Optické prvky jsou hodnoceny na základě křivky svítivosti, vlastní účinnosti, vyzařovacího úhlu, výšky křivky svítivosti cd/lm. V potaz je vzat i vliv optického prvku na teplotu chromatičnosti a spektrální průběh světelného zdroje LED. V poslední kapitole se zabýváme volbou nejvhodnější kombinace optického prvku a LED na základě vstupních požadavků.

8.1 Současný stav

V současnosti jsou optické prvky z fotometrického hlediska hodnoceny účinností, vyzařovacím úhlem (FWHM nebo úhel pole) a výškou křivky svítivosti cd/lm. Někteří producenti optických prvků navíc nabízí křivky svítivosti uložené v datovém formátu EULUMDAT popřípadě IES. Výrobci mohou předkládat parametry optických prvků zjištěné na základě simulačních výpočtů. Otázka vlivu optických prvků na barevné vlastnosti LED není v současnosti řešena.

Rovněž není vyřešen rozptyl teploty chromatičnosti u světelných zdrojů LED. Současným výrobním postupem nelze vyrábět čipy se stejným rozsahem teplotou chromatičnosti. Dochází však ke třídění vyrobených LED čipů na základě rozptylu teploty chromatičnosti. Podrobněji viz [47].

8.2 Shrnutí poznatků práce

Tato práce se zabývá především hodnocením optických prvků a zkoumá jejich vliv na světelné parametry LED. Obecně užívané parametry hodnotící optické prvky jsou účinnost, vyzařovací úhel, výška křivky svítivosti cd/lm a tvar křivky svítivosti (symetrická, asymetrická). Výhodu je pokud výrobce poskytuje datové soubory EULUMDAT nebo IES. Spotřebitel si tak může

prohlédnout naměřené křivky svítivosti optického prvku ve 2D nebo i 3D grafu dle možností programu.

Měření pro hodnocení optických parametrů zahrnovalo 13 vzorků optických prvků a 3 vzorky světelných zdrojů LED. Optické prvky jsme si rozdělili na skupinu čoček a TIR optických prvků. Nejvyšší účinnosti byly zjištěny u čoček, zatímco optiky TIR měly účinnost nižší. Nejvyšší hodnoty cd/lm byly zjištěny u TIR optických prvků, protože měly ostré vyzařovací úhly. Na základě naměřených dat byla zjištěna jistá podobnost průběhu CT LED a průběhu CT optických prvků. Jedná se o klesající charakter CT v úhlech vyšších než $\gamma = 0^\circ$. To však platí jen pro optické prvky se symetrickou plochou svítivosti. Neutrální LED má velmi rovnoměrný průběh CT a to se promítá i v průběhu CT optických prvků.

Lze říci výrok, že optický prvek má vliv na průběh CT LED. CT optického prvku je vázána s průběhem křivek svítivosti samotné optiky a s průběhem CT LED. Jedná se o velmi individuální záležitost a jiné soustavy LED s optikou budou mít odlišné průběhy CT.

8.3 Návrh dalšího postupu

Měření křivek svítivosti a ukládání naměřených dat probíhalo ručně a bylo velmi zdlouhavé. Tento proces by se mohl snadno automatizovat použitím řízeného goniofotometru a odpovídajícího softwaru.

Další postup by mohl být ve tvorbě aplikace, která na základě požadavků zákazníka vybere nejvhodnější kombinaci LED a optického prvku. Výběr by probíhal z již naměřených světelných soustav LED a optického prvku na základě parametrů LED, optického prvku, a také by se zahrnul rozsah a rovnoměrnost teploty chromatičnosti.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BUREŠ, J. *Converter: André Eugene Blondel* [online]. [cit. 2012-3-11]. <http://www.converter.cz/fyzici/blondel.htm>
- [2] PROF. ING HABEL, J. DRSC. *SVĚTLO, časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Základy fotometrie (2. část)* [online]. [cit. 2012-4-11]. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39391
- [3] ING. BAXANT, P. PH.D, ING. DRÁPELA, J. *Světelná technika: Laboratorní cvičení*. Skriptum. 53 s. [cit. 2012-10-11].
- [4] Elektrotechnický zkušební ústav, s.p. *Kulový integrátor* [online]. [cit. 2012-9-11]. <http://www.ezu.cz/index.php?u=/vybaveni-nasich-laboratori/vyblab-svetelne-zdroje/kulovy-integrator/&a=ArticleDisplay>
- [5] ING. BAXANT, P. PH.D, ING. DRÁPELA, J. *Užití elektrické energie: Laboratorní cvičení*. Skriptum, 53 s. [cit. 2012-17-11].
- [6] ING. KUŽEL, J. *SVĚTLO, časopis pro světelnou techniku a osvětlování: Měření osvětlení*. SZU Praha [online]. [cit. 2012-17-11]. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23266
- [7] DOC. ING. GAŠPAOVSKÝ, D. PH.D, PROF. SMOLA, A. *Návrh umělého osvětlení interiérů a exteriérů*. 262 s. Bratislava 2011. ISBN 978-80-8106-046-5. [cit. 2012-24-11].
- [8] PROF. ING. SOKANSKÝ, CSC. a další. *Světelná technika*. 256 s. Praha 2011. ISBN 978-80-01-04941-9. [cit. 2012-25-11].
- [9] ING. BAXANT, P. PH.D. *Světelná technika*. Skriptum, 82 s. [cit. 2012-26-11].
- [10] Laboratoř světelné techniky. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT Brno. *Měřicí úlohy do laboratorních cvičení: Ověření vlastností kosinového nastavce*. [online]. [cit. 2012-29-11]. http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/09_Overeni_vlastnosti_kosinoveho_nadstavce.pdf
- [11] PRC Krochmannn, Photometry Radiometry Colorimetry. *RadioLux 111*. [online]. [cit. 2012-29-11]. <http://www.prc-krochmann.com/images/Downloads/111eneu.pdf>
- [12] Laboratoř světelné techniky. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT Brno. *Měřicí úlohy do laboratorních cvičení: Měření osvětlení malých světelných zdrojů*. [online]. [cit. 2012-31-11]. http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/61_Mereni_osvetleni_od_malych_svetelnych_zdroju.pdf
- [13] Encyklopedie fyziky. *Fotometrické veličiny*. [online]. [cit. 2012-30-12]. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [14] ELKOVO ČEPÍK, Výroba a prodej zářivkových a LED svítidel – Česká republika. *Fotometrie*. [online]. [cit. 2012-31-12]. <http://www.elkovo-cepelik.cz/fotometrie>
- [15] Norma. *ČSN EN 13032-1*. [online]. [cit. 2012-31-12]. Dostupné na <http://csnonline.unmz.cz/>
- [16] MINÁŘ, P. *Návrh konstrukce automatizovaného goniofotometru, polohovacího zařízení pro měření svítidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008.

- 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Blecha, Ph.D. [online]. [cit. 2012-8-12].
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6311
- [17] VOJTÍK, OLDŘICH. PROFI lighting spol. s.r.o. *Reflektorová svítidla firmy LTS s využitím techniky PRI*. [online]. [cit. 2012-8-12].
<http://www.profilighting.cz/uploads/Sv%C4%9Btlo%202007-1%20-%20Lts%20refl.%20s%20PRI%20technologi%C3%AD%20-%20%C4%8DI%C3%A1nek.pdf>
- [18] Laboratoř světelné techniky. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT Brno. *Měřicí úlohy do laboratorních cvičení: Měření fotometrických veličin spektrometrem*. [online]. [cit. 2012-9-12].
http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/71_Mereni_fotometrickych_velicin_spektrometrem.pdf
- [19] CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. *Advancing knowledge and providing standardization to improve the lighted environment*. [online]. [cit. 2012-9-12].
<http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/About+us>
- [20] Směrnice CIE 127:1997. [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné na www:
<http://wenku.baidu.com/view/b6e1f449e45c3b3567ec8b94.html>
- [21] Střední průmyslová škola, Česká Lípa. Výukové materiály. *Fotometrie: Fotometrické veličiny*. [online]. [cit. 2012-12-12].
http://www.sps-cl.cz/~huzva/Soubory/Fyzika/11_fotometrie/fotometrie.htm
- [22] Power Tech, spol. s.r.o. *Základní pojmy*. [online]. [cit. 2012-12-12].
<http://www.power-tech.cz/led-lighting-pojmy.php>
- [23] LED produkty. Osvětlovací technika. LED technologie: *Teplota chromatičnosti*. [online]. [cit. 2012-12-12].
<http://www.led-produkty.cz/led-produkty/7-LED-TECHNOLOGIE>
- [24] WIKIPEDIE. Otevření encyklopedie. Světelný zdroj: *Spojité spektrum ideálního zářiče*. [online]. [cit. 2012-13-12]. http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Spektrum_2.png
- [25] ING. BAXANT, P. PH.D, ING. DRÁPELA, J. *Užití elektrické energie*. Skriptum, 186 s. [cit. 2012-17-11].
- [26] PROF. ING HABEL, J. DRSC. Tzb-info. *Vývojové tendence ve světelných zdrojích a svítidlech*. [online]. [cit. 2012-10-11].
<http://www.svn.cz/assets/files/informacni-materialy/2012/Svetelne-zdroje-a-svitidla-ve-VO.pdf>
- [27] PHOTOMETRIC & OPTICAL TESTING. *Talking Photometry: Understanding Photometric Data Formats*. [online]. [cit. 2014-6-5].
http://www.photometrictesting.co.uk/File/understanding_photometric_data_files.php
- [28] EULUMDAT File Format Specification. *Proposal for a Data Format for Exchange of Luminaire Data*. [online]. [cit. 2014-20-3]. <http://www.helios32.com/Eulumdat.htm>
- [29] Software. *QLumEdit-Eilumdat file editor*. [online]. [cit. 2014-20-3].
<http://sourceforge.net/projects/qlumedit/>

- [30] Software. *IESviewer (photometric viewer)*. [online]. [cit. 2014-20-3]. http://www.photometricviewer.com/1_4_Download.html
- [31] Software. *ILEXA Ray-Viewer*. [online]. [cit. 2014-20-3]. http://www.ilexa.de/ilexa_2012/page4e.htm
- [32] PROF. ING. HABEL, J. DRSC A KOL. *Světlo a osvětlování*. 624 s. Praha 2013. ISBN 978-80-86534-21-3. [cit. 2014-25-3].
- [33] Katalogové listy. *Sekundární optické členy pro POWER LED CREE*. [online]. [cit. 2014-20-3]. www.tron.cz/Data/Produktove-listy/LED_opticke_cleny
- [34] Katalogové listy. *PRODUCT FAMILY DATA SHEET Cree XLamp XT-E LEDs*. [online]. [cit. 2014-6-5]. http://www.cree.com/sitecore%20modules/web/~/_media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXTE.pdf#search=%22xte%22
- [35] Katalogové listy. *PRODUCT FAMILY DATA SHEET Cree XLamp XP-E LEDs*. [online]. [cit. 2014-6-5]. www.cree.com/sitecore%20modules/web/~/_media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXPE.pdf#search=%22xpe%22
- [36] Katalogové listy. *PRODUCT FAMILY DATA SHEET Cree XLamp XP-G LEDs*. [online]. [cit. 2014-6-5]. www.cree.com/sitecore%20modules/web/~/_media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXPG.pdf#search=%22xpg%22
- [37] ING. BAXANT, P. PH.D. Skriptum. *Osvětlovací soustavy*. Brno, FEKT Vysoké učení technické v Brně. 55 s. [cit. 2012-17-11].
- [38] KUNTZE, T. President LEDIL OY. Článek v časopise LED professional. *All Facts for Choosing LED Optics Correctly*. [online]. [cit. 2014-6-5]. http://ledil.fi/sites/default/files/Documents/Technical/Articles/Article_1.pdf
- [39] Presentation. *AnyCasting LED Optics*. [online]. [cit. 2014-6-5]. http://www.anyoptics.com/en/download/AnyCasting_Lens_catalog.pdf
- [40] VYSOUDIL, M. *Fotometrie a spektrometrie zapouzdřených LED čipů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D. [cit. 2014-6-5].
- [41] Čočky.cz. *Asférické kontaktní čočky*. [online]. [cit. 2014-6-5]. <http://www.cocky.cz/asfericke-kontaktni-cocky.html>
- [42] Wikipedia.org. *LED*. [online]. [cit. 2014-6-5]. <http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>
- [43] Flashlightwiki.com. *Lenses*. [online]. [cit. 2014-6-5]. <http://flashlightwiki.com/Lenses>
- [44] Katalogové listy LEDIL. *TIR Lens Guide*. [online]. [cit. 2014-6-5]. http://www.ledil.com/sites/default/files/tir_lens_guide-web.pdf
- [45] CHAUDHARI, S. Element14. *Quickly setup your Lighting solution with Cree® XLamp® MC-E series Star Board*. [online]. [cit. 2014-6-5]. <http://www.newark.com/pdfs/techarticles/cree/MCEseriesAppNote.pdf>
- [46] E-Light.cz. *Barvy a teplota světla – vlastnosti podání barev zářivek podle DIN 12464-1*. [online]. [cit. 2014-6-5]. <http://www.e-light.cz/news/view.php?id=142>

-
- [47] E-Light.cz. *Co je dobré vědět o LED světelných zdrojích*. [online]. [cit. 2014-6-5].
<http://www.e-light.cz/zprava/co-je-dobre-vedet-o-led-svetelných-zdrojích/>
- [48] SOKANSKÝ, K. A KOL. Skriptum. *Základy základů světelné techniky*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. 41 s. [online].
[cit. 2012-17-11].
feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/VUEE_Zaklady_svetelne_tech_niky.pdf

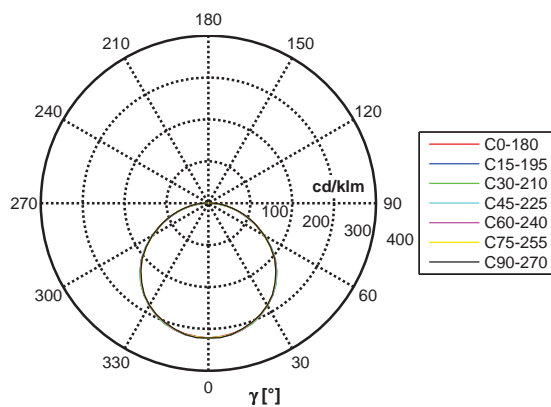
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A-1: LED XP- E s optickými moduly
- Příloha A-2: LED XP- G s optickými moduly
- Příloha A-3: LED XT- E s optickými moduly
- Příloha B-1: Úprava naměřených dat, skript v Pythonu
- Příloha B-2: Iterace; výpočet korekčních koeficientů na symetrii
- Příloha B-3: Tvorba 2D grafu a 3D modelu svítivosti v Matlabu
- Příloha C-1: Fotografie optických modulů
- Příloha C-2: Fotografie LED
- Příloha D-1: Program AvaSoft© 7.3 Full – 2008 Avantes
- Příloha D-2: Programy pro tvorbu a analýzu souboru EULUMDAT
- Příloha E-1: Přehled naměřených a vypočítaných parametrů LED s optikami pro proud 0,1 A dle typu LED
- Příloha E-2: Přehled naměřených a vypočítaných parametrů LED s optikami pro proud 1 A dle typu LED
- Příloha E-3: Přehled naměřených a vypočítaných parametrů LED s optikami pro proud 0,1 i 1 A dle parametru
- Příloha F-1: Návrh hlavy goniofotometru
- Příloha F-2: Návrh úchytky pro hlavu goniofotometru
- Příloha G-1: Teploty chromatičnosti LED XP-E s vybranými optickými moduly
- Příloha G-2: Teploty chromatičnosti LED XP-G s vybranými optickými moduly
- Příloha G-3: Teploty chromatičnosti LED XT-E s vybranými optickými moduly
- Příloha H-1: Spektrální průběh LED XP-E
- Příloha H-2: Spektrální průběhy LED XP-E s optickým modulem C11185
- Příloha H-3: Spektrální průběhy LED XP-E s optickým modulem CA11256
- Příloha H-4: Spektrální průběhy LED XP-E s optickým modulem FA10708
- Příloha H-5: Spektrální průběh LED XP-G
- Příloha H-6: Spektrální průběhy LED XP-G s optickým modulem C11185
- Příloha H-7: Spektrální průběhy LED XP-G s optickým modulem CA11256
- Příloha H-8: Spektrální průběhy LED XP-G s optickým modulem FA10708
- Příloha H-9: Spektrální průběh LED XT-E
- Příloha H-10: Spektrální průběhy LED XT-E s optickým modulem C11185
- Příloha H-11: Spektrální průběhy LED XT-E s optickým modulem CA11256
- Příloha H-12: Spektrální průběhy LED XT-E s optickým modulem FA10708
- Příloha I-1: Tvorba 3D spektrálního modelu v Matlabu
- Příloha J-1: Přehled parametrů optických prvků
- Příloha DVD: Naměřená a zpracovaná data; výsledky; katalogové listy a další

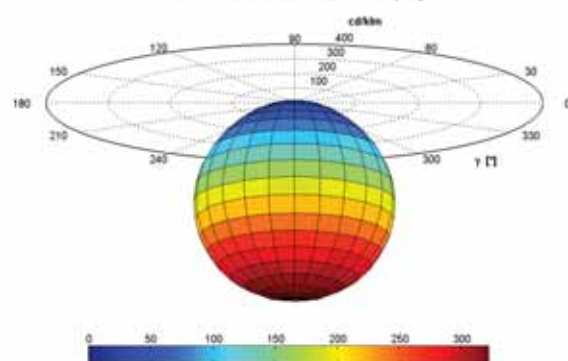
PŘÍLOHY

Příloha A-1: LED XP-E s optickými moduly

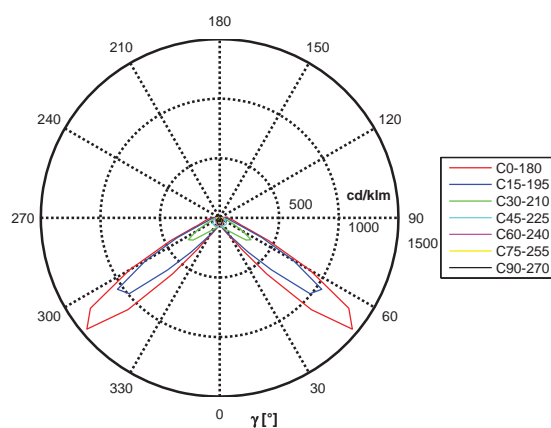
Křivky svítivosti XP-E bez optiky



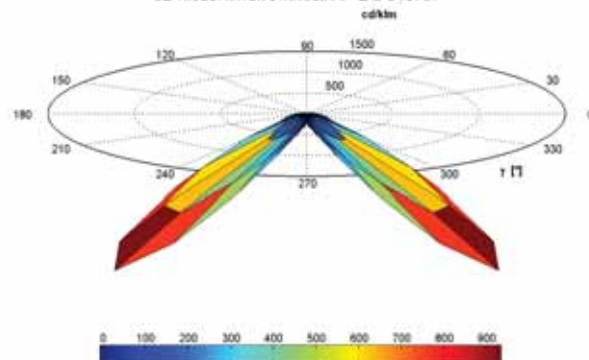
3D model křivek svítivosti XP-E bez optiky



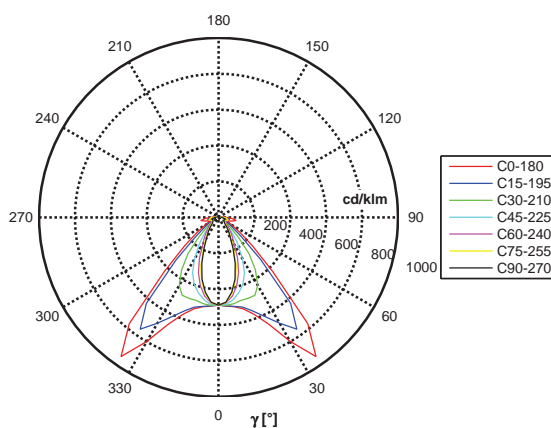
Křivky svítivosti XP-E s C10757



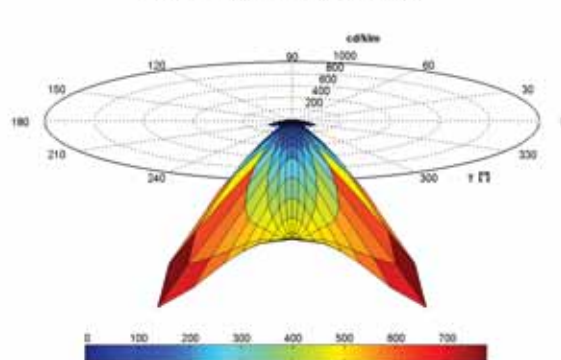
3D model křivek svítivosti XP-E s C10757



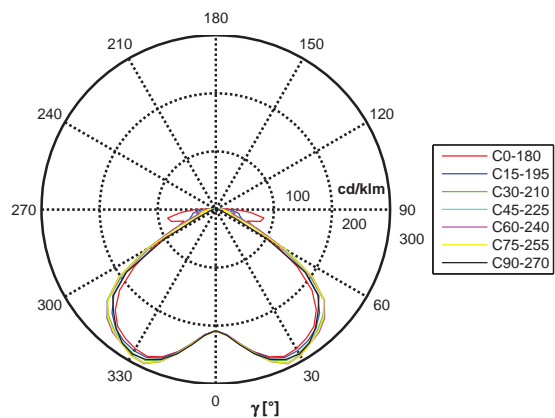
Křivky svítivosti XP-E s C10924



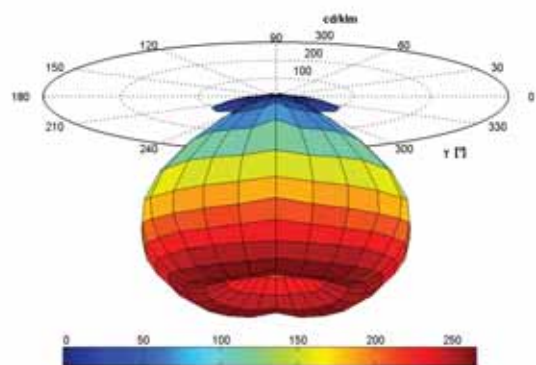
3D model křivek svítivosti XP-E s C10924



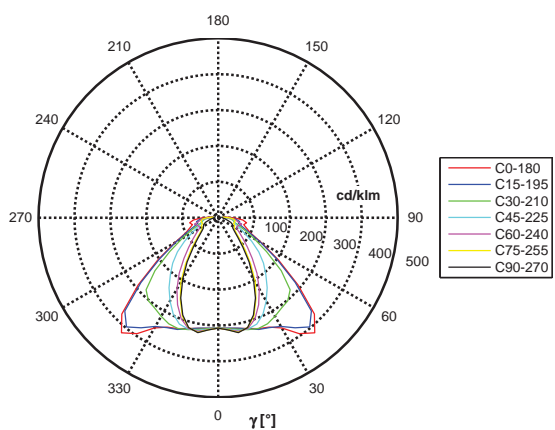
Křivky svítivosti XP-E s C10966



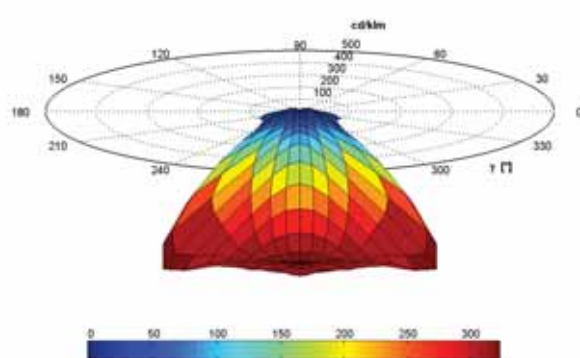
3D model křivek svítivosti XP-E s C10966



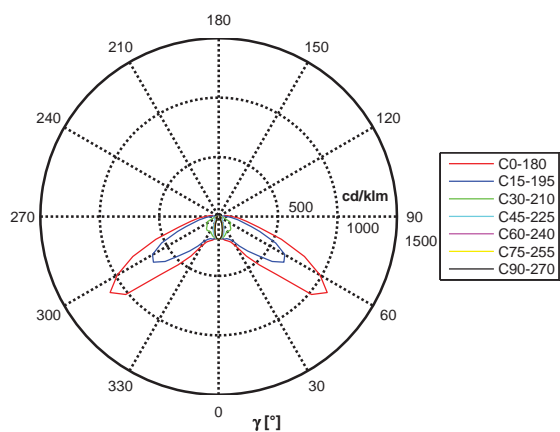
Křivky svítivosti XP-E s C11185



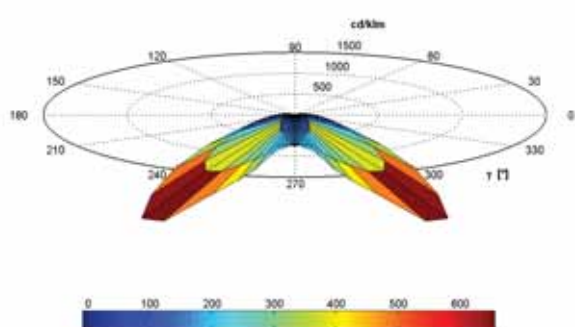
3D model křivek svítivosti XP-E s C11185



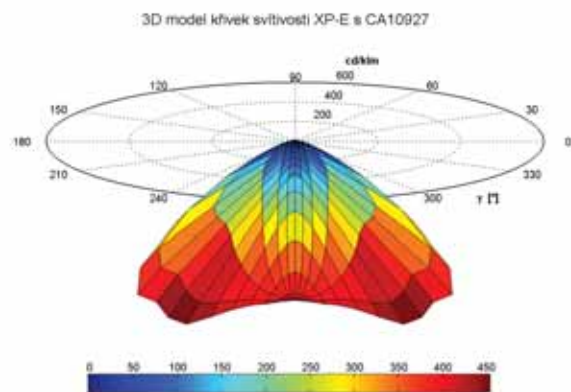
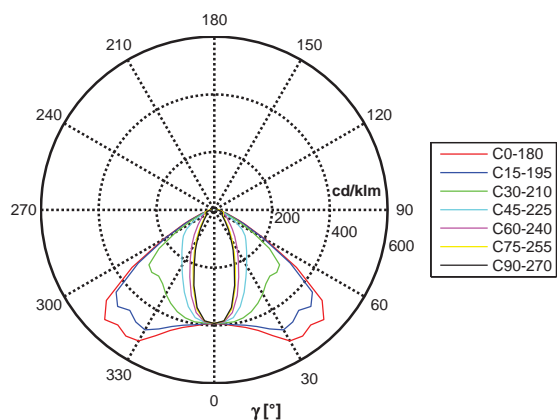
Křivky svítivosti XP-E s CA10823



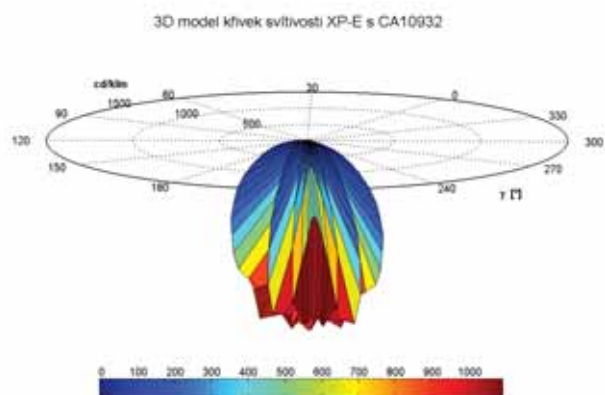
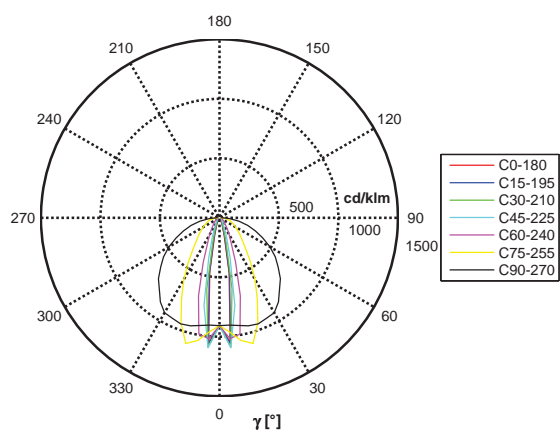
3D model křivek svítivosti XP-E s CA10823



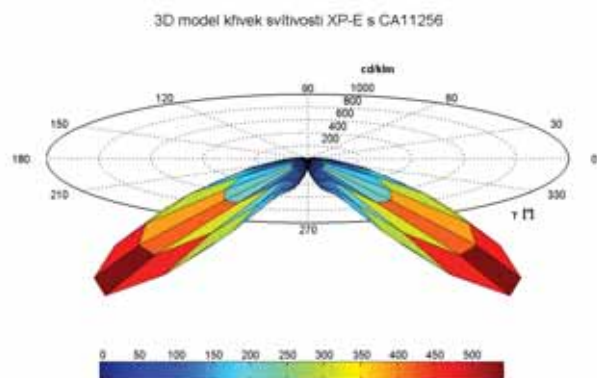
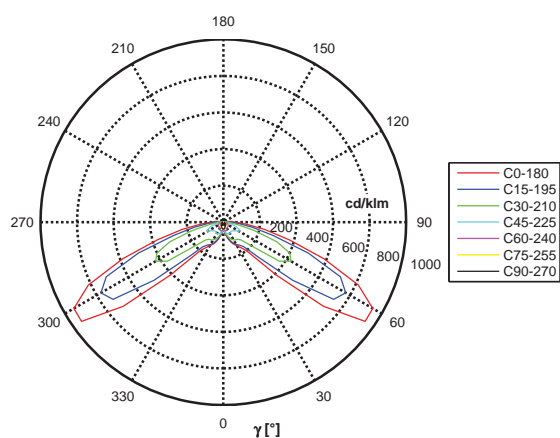
Křivky svítivosti XP-E s CA10927

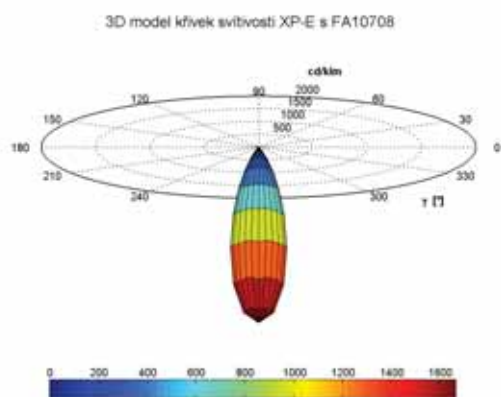
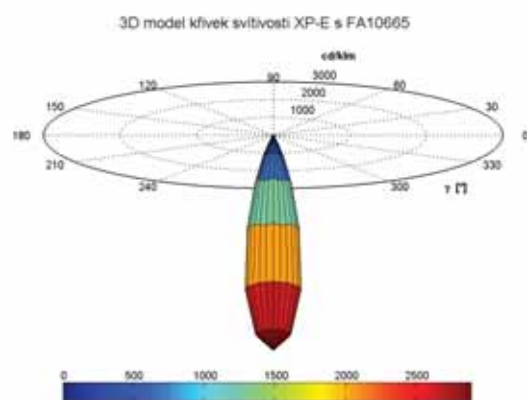
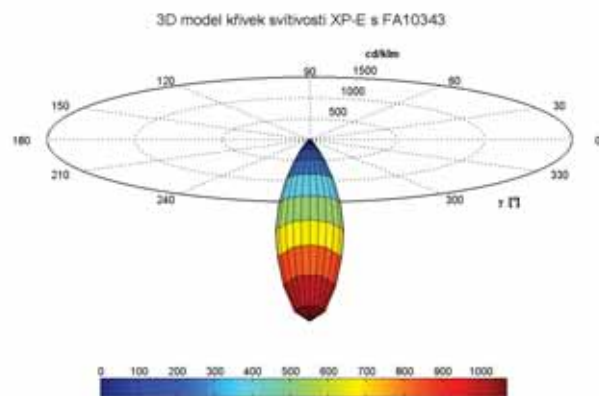


Křivky svítivosti XP-E s CA10932

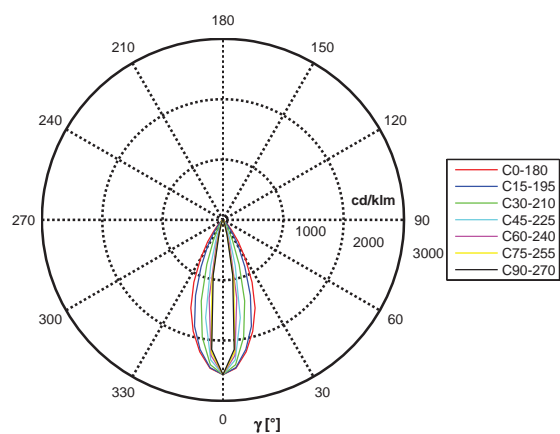


Křivky svítivosti XP-E s CA11256

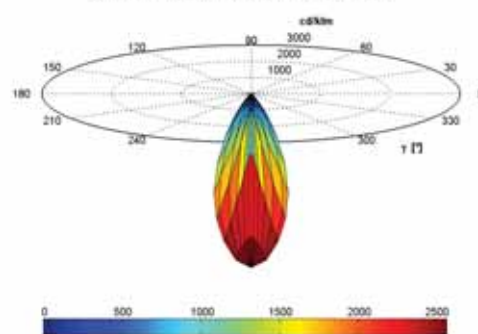




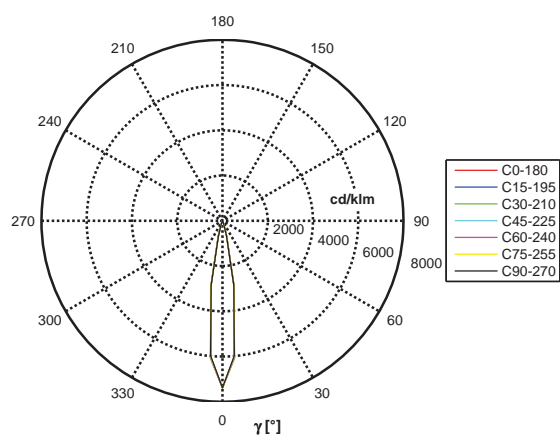
Křivky svítivosti XP-E s FCA10306



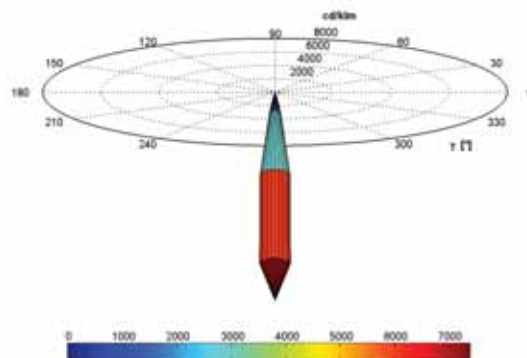
3D model křivek svítivosti XP-E s FCA10306



Křivky svítivosti XP-E s FCA10328

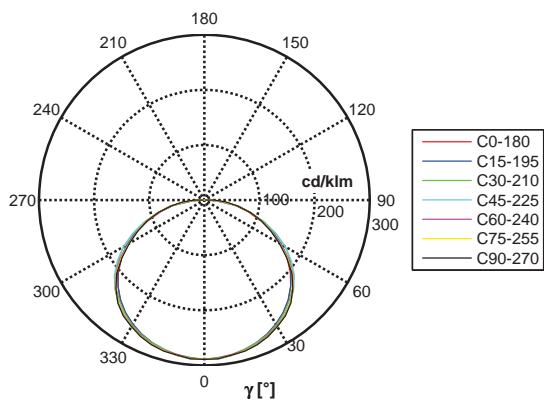


3D model křivek svítivosti XP-E s FCA10328

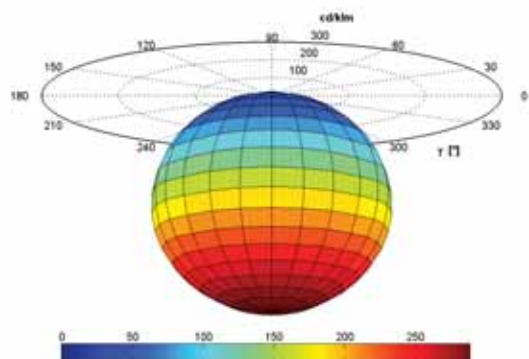


Příloha A-2: LED XP-G s optickými moduly

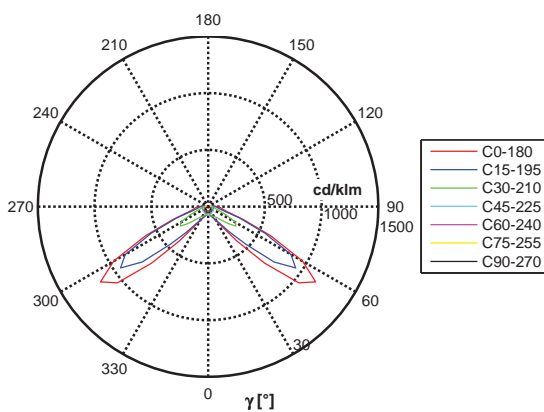
Křivky svítivosti XP-G bez optiky



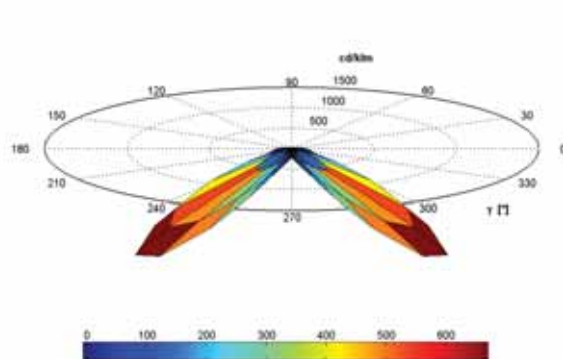
3D model křivek svítivosti XP-G bez optiky



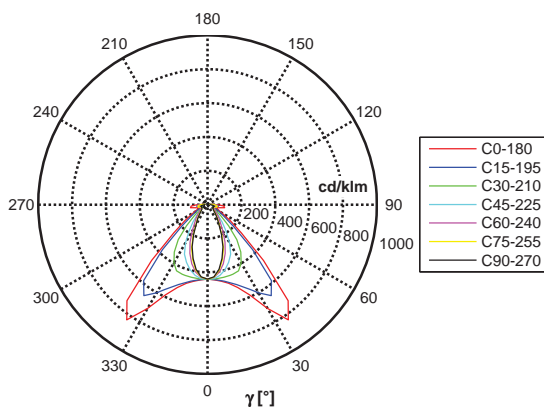
Křivky svítivosti XP-G s C10757



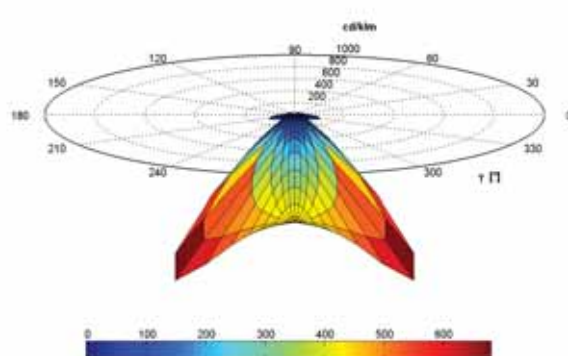
3D model křivek svítivosti XP-G s C10757



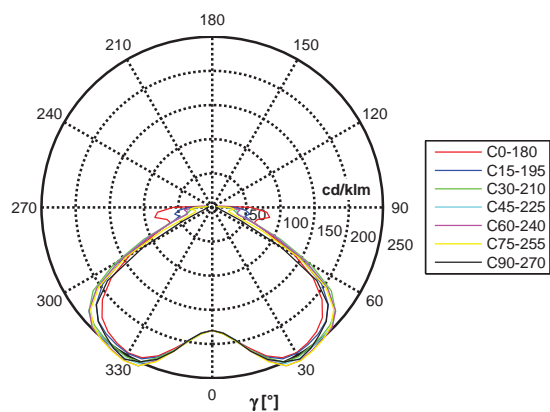
Křivky svítivosti XP-G s C10924



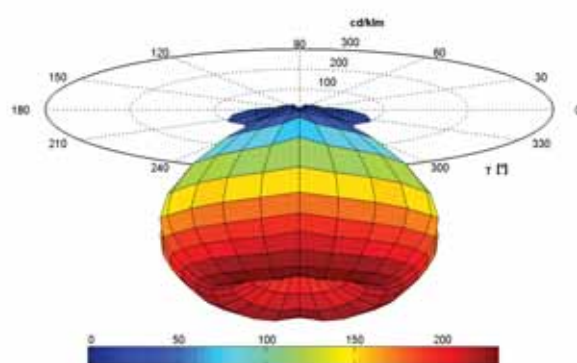
3D model křivek svítivosti XP-G s C10924



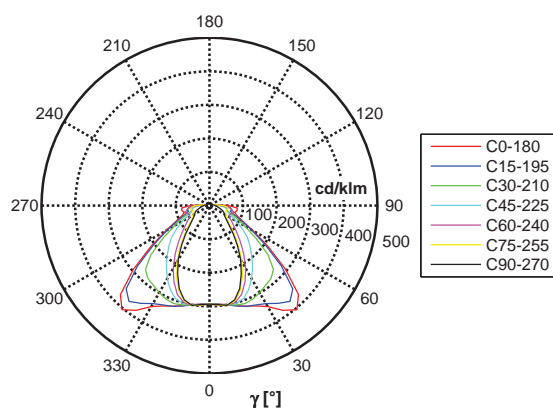
Křivky svítivosti XP-G s C10966



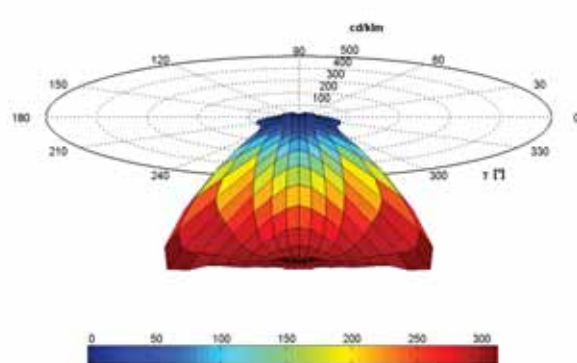
3D model křivek svítivosti XP-G s C10966



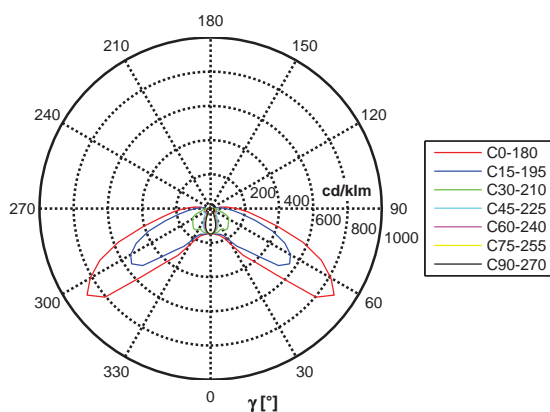
Křivky svítivosti XP-G s C11185



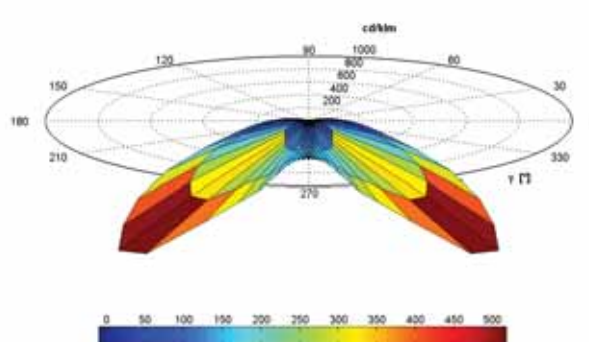
3D model křivek svítivosti XP-G s C11185



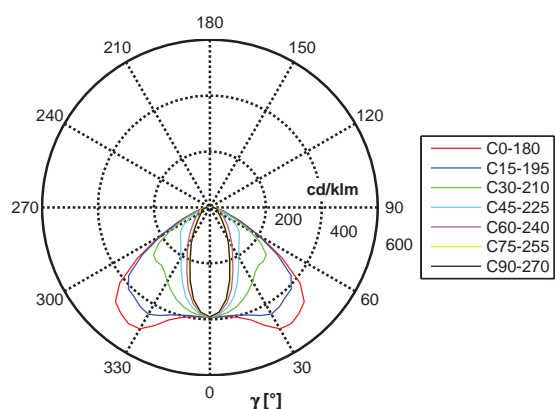
Křivky svítivosti XP-G s CA10823



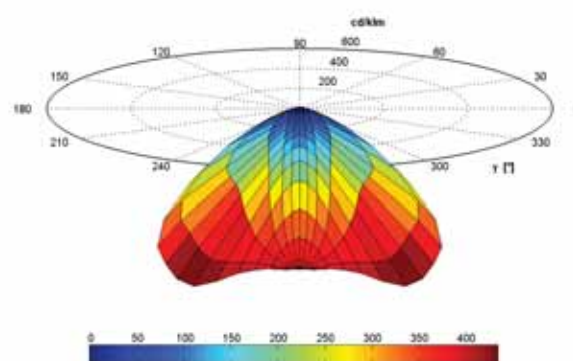
3D model křivek svítivosti XP-G s CA10823



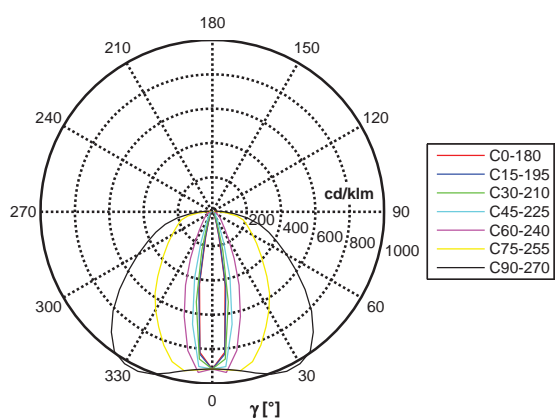
Křivky svítivosti XP-G s CA10927



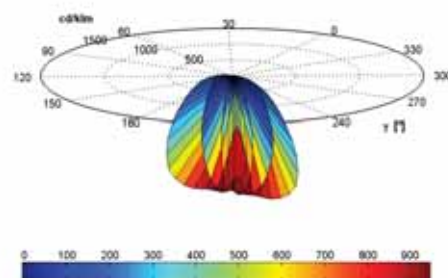
3D model křivek svítivosti XP-G s CA10927



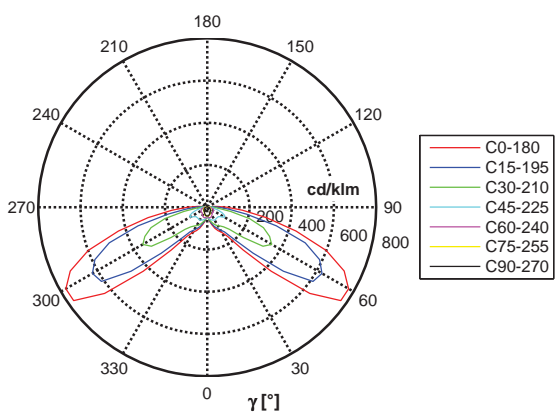
Křivky svítivosti XP-G s CA10932



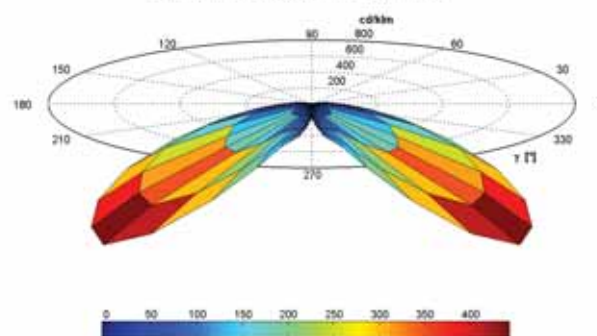
3D model křivek svítivosti XP-G s CA10932



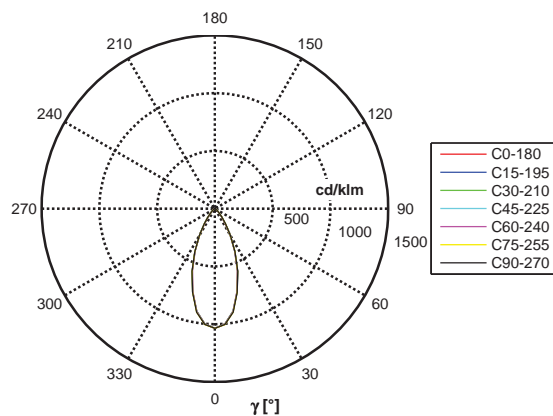
Křivky svítivosti XP-G s CA11256



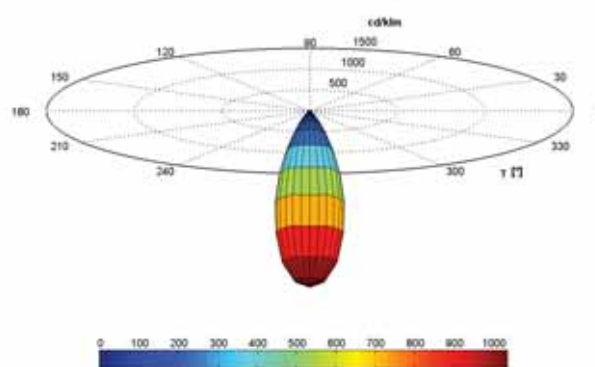
3D model křivek svítivosti XP-G s CA11256



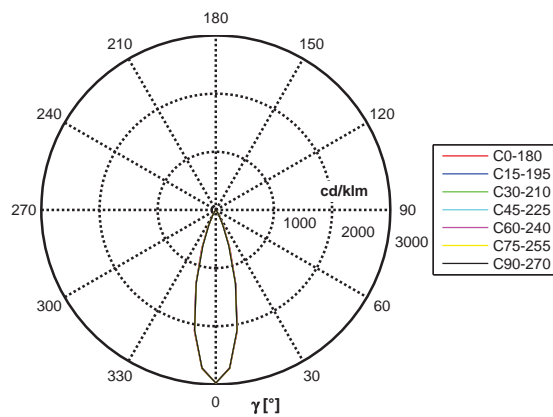
Křivky svítivosti XP-G s FA10343



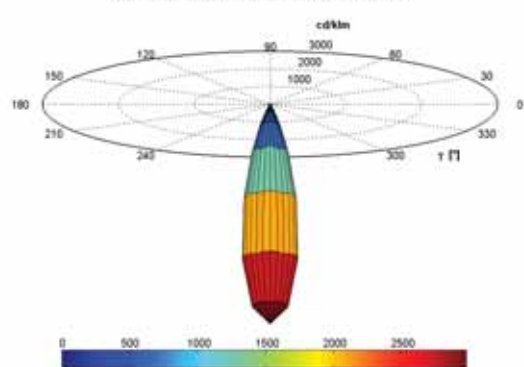
3D model křivek svítivosti XP-G s FA10343



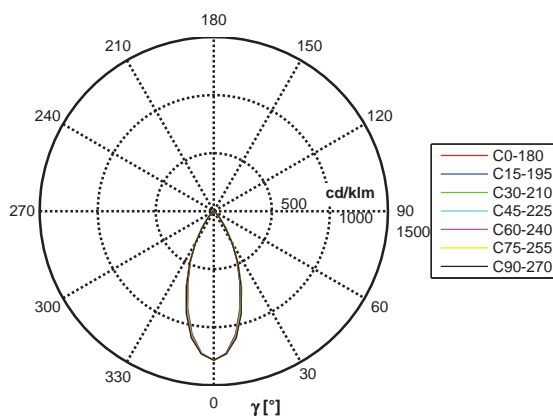
Křivky svítivosti XP-G s FA10665



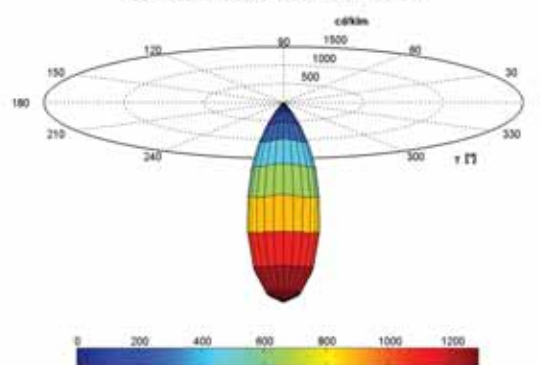
3D model křivek svítivosti XP-G s FA10665



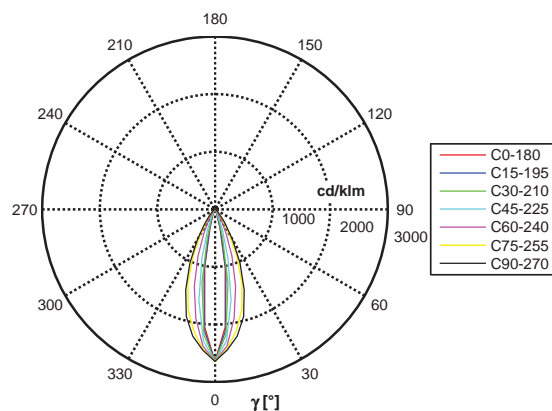
Křivky svítivosti XP-G s FA10708



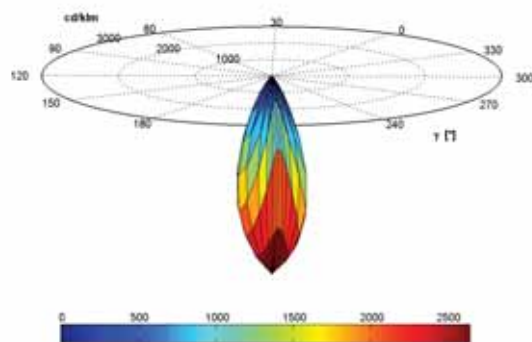
3D model křivek svítivosti XP-G s FA10708



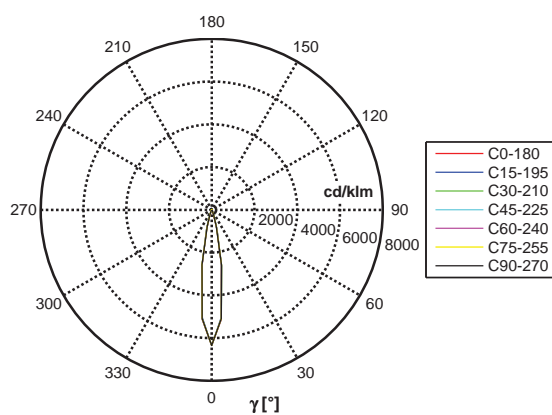
Křivky svítivosti XP-G s FCA10306



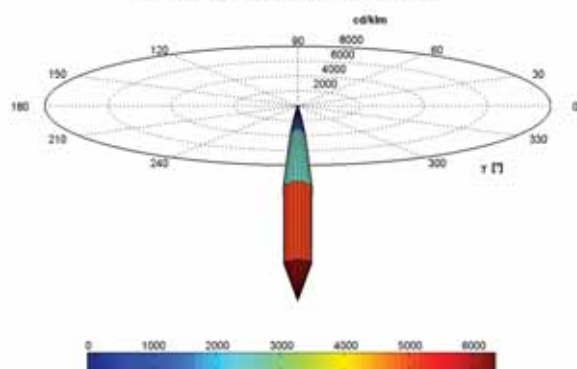
3D model křivek svítivosti XP-G s FCA10306



Křivky svítivosti XP-G s FCA10328

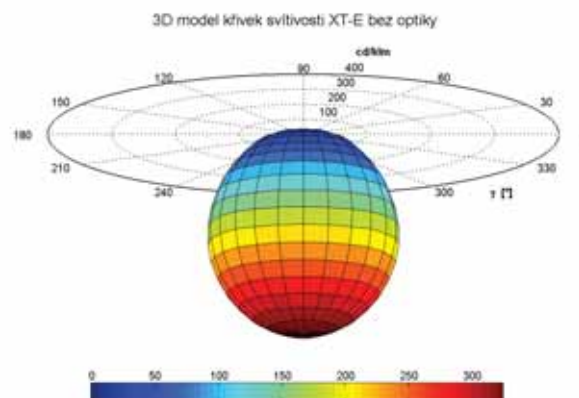
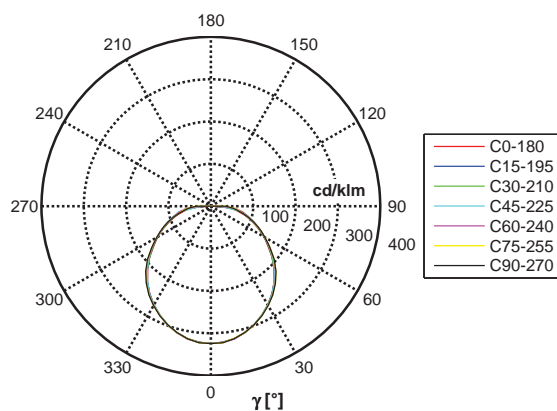


3D model křivek svítivosti XP-G s FCA10328

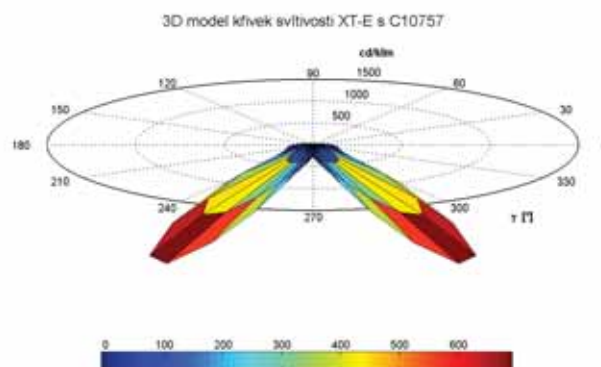
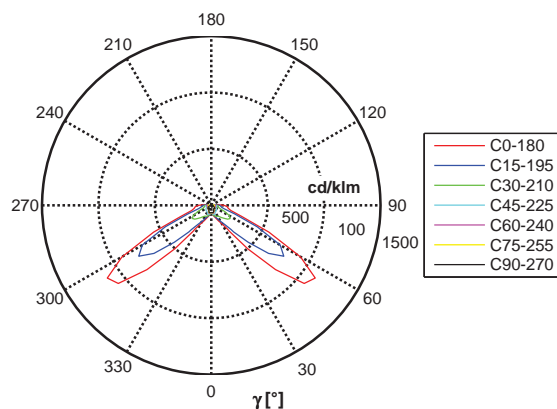


Příloha A-3: LED XT-E s optickými moduly

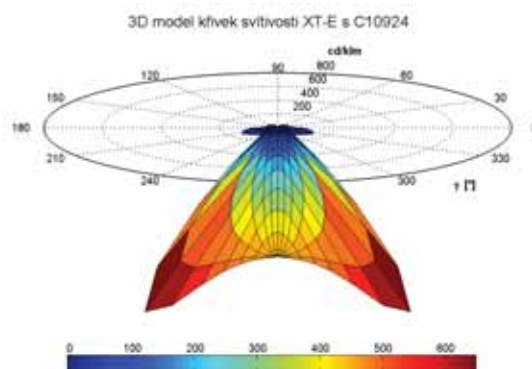
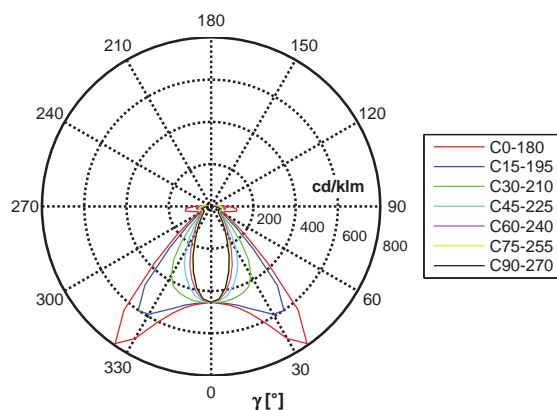
Křivky svítivosti XT-E bez optiky



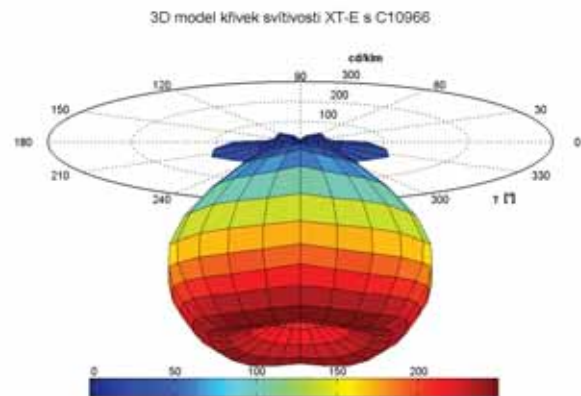
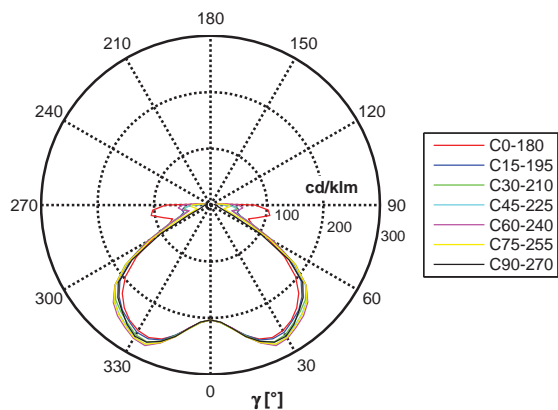
Křivky svítivosti XT-E s C10757



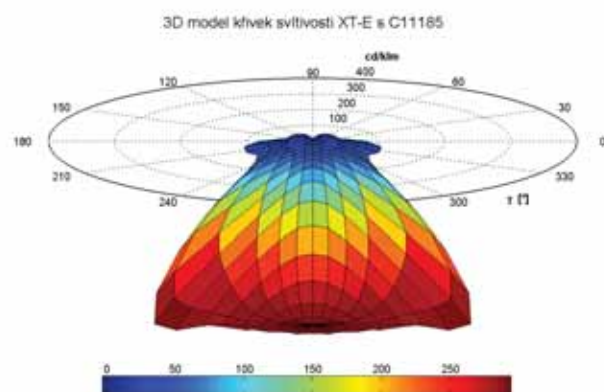
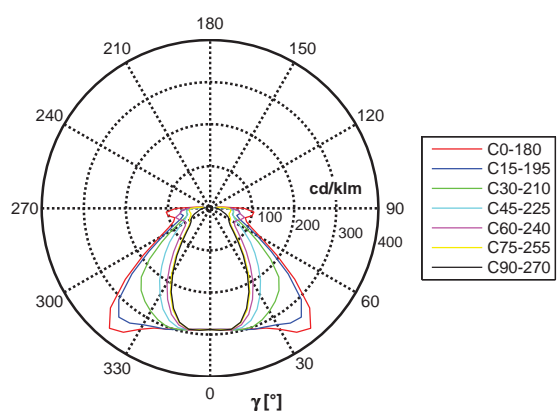
Křivky svítivosti XT-E s C10924



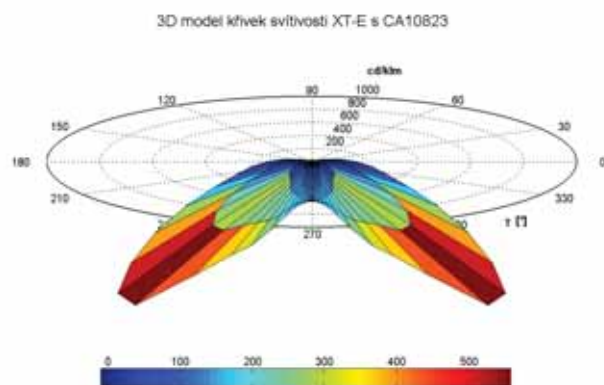
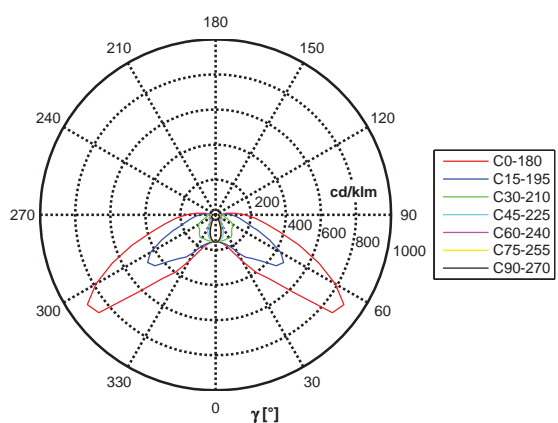
Křivky svítivosti XT-E s C10966



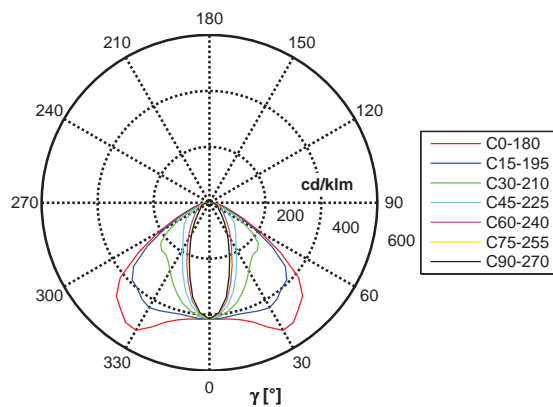
Křivky svítivosti XT-E s C11185



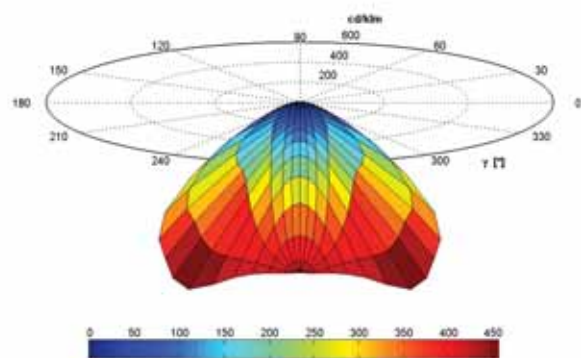
Křivky svítivosti XT-E s CA10823



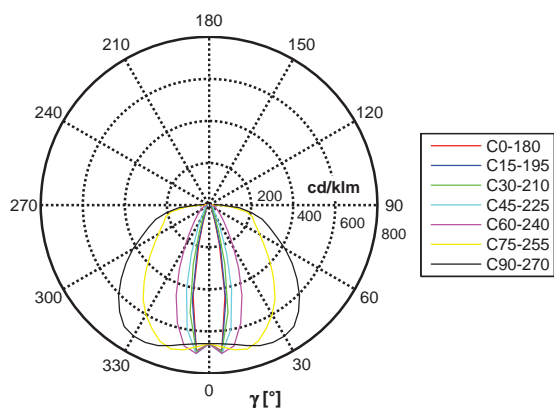
Křivky svítivosti XT-E s CA10927



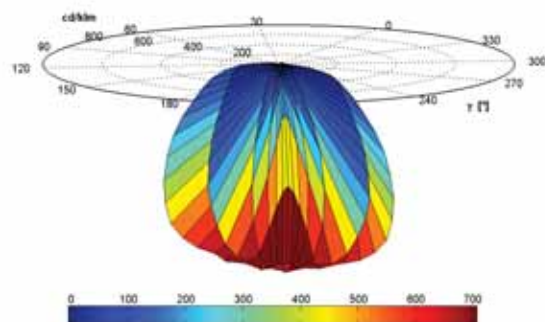
3D model křivek svítivosti XT-E s CA10927



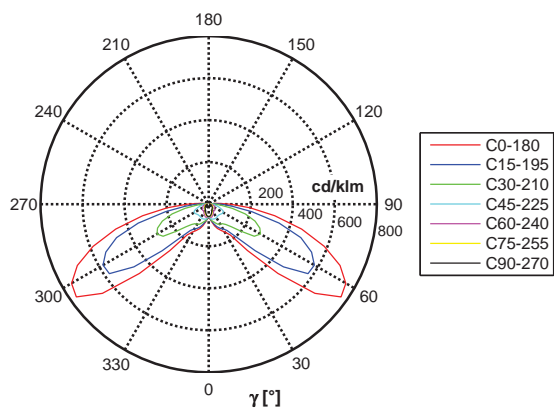
Křivky svítivosti XT-E s CA10932



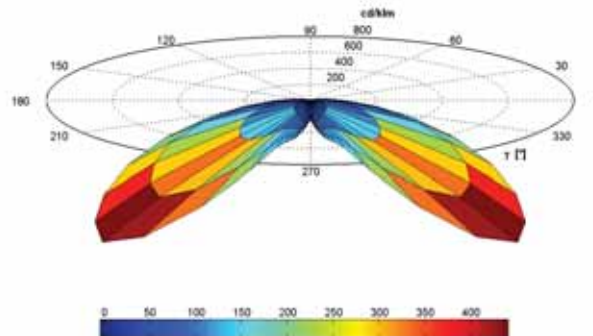
3D model křivek svítivosti XT-E s CA10932



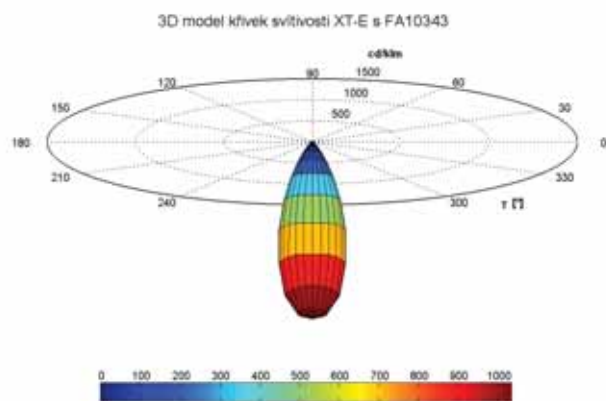
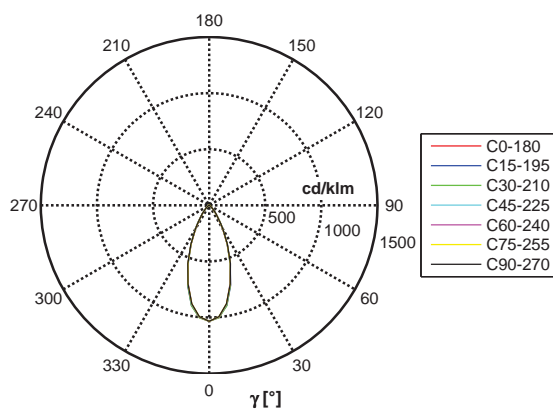
Křivky svítivosti XT-E s CA11256



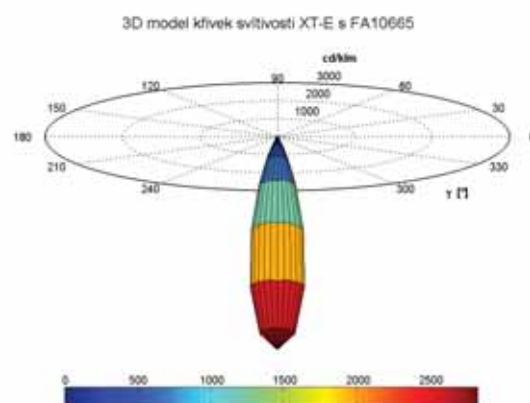
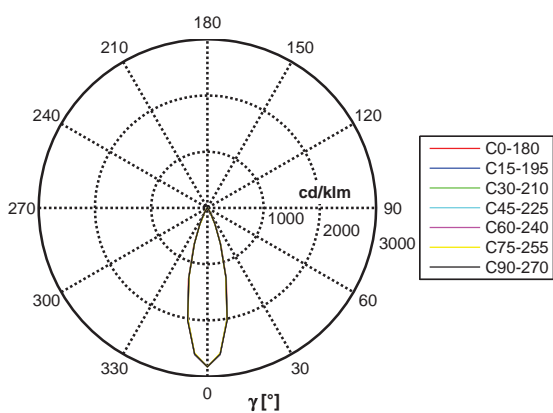
3D model křivek svítivosti XT-E s CA11256



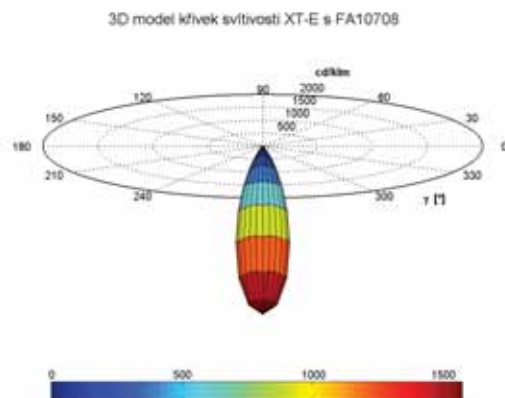
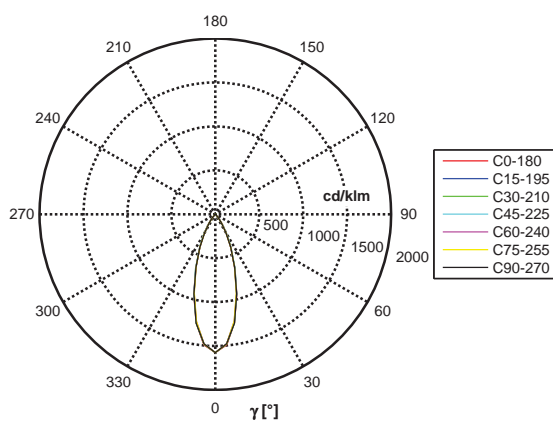
Křivky svítivosti XT-E s FA10343



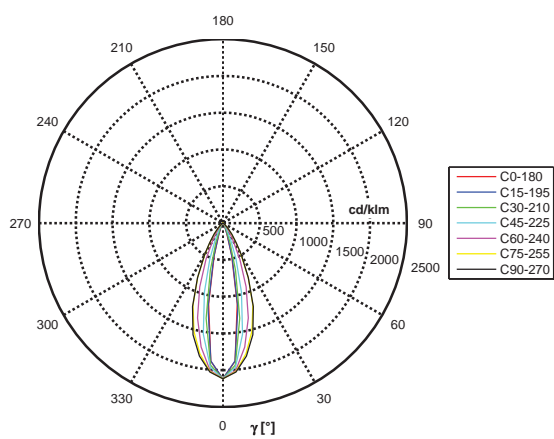
Křivky svítivosti XT-E s FA10665



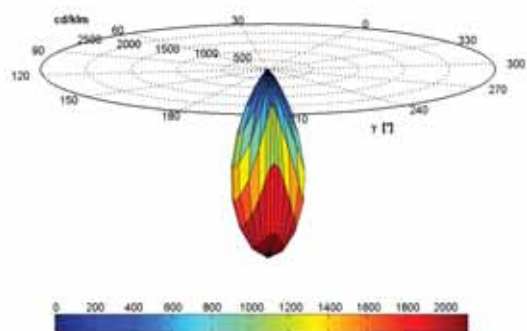
Křivky svítivosti XT-E s FA10708



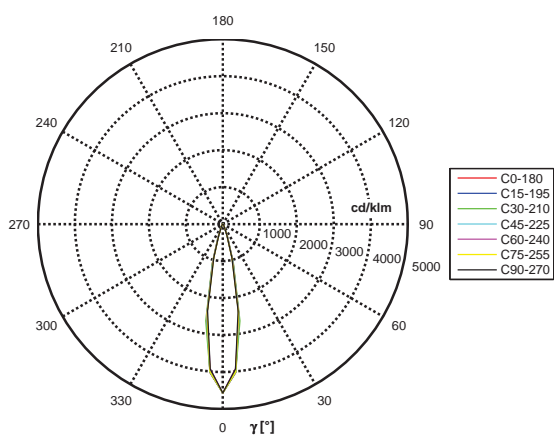
Křivky svítivosti XT-E s FCA10306



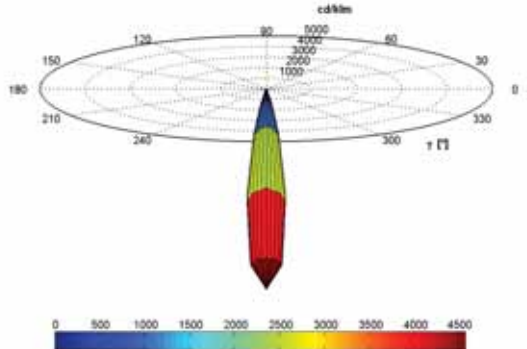
3D model křivek svítivosti XT-E s FCA10306



Křivky svítivosti XT-E s FCA10328



3D model křivek svítivosti XT-E s FCA10328



Příloha B-1: Úprava naměřených dat, skript v Pythonu

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon Mar 25 12:37:43 2013

@author: James; George

Gets measured values into one CSV file.
Process all *.xls files, selects only within wavelength range 380;780, if value is negativ, makes it
zero.
"""

import xlrd
import xlwt
import os
import string

WORK_DIR = r'S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP_E s FCA10328'
# Adresář s adresáři, která obsahují jednotlivá měření
MEASURE_FILE = "S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP_E s FCA10328\CT.csv"
# soubor, kam se mají vypsat měření z *.txt souborů v adresářích
PROCESSED_MEASURE_AFIX = "_v2"
# přidá k názvu *.xls souboru, který se zpracoval
# skript za symbolem "-->" patri k predchozimu radku

USER_COMMENTS = "User comments: "
LUMINOUS_INTENSITY = "Luminous Intensity = "
CT = "ct = "

def GetValuesIntoFile(FileName, Path):
    #goes through WORK_DIR directories and call GetMeasureValues for any *.txt files with
    measure values
    loutputFile = open(MEASURE_FILE, "w")
    dirs = os.walk(Path).next()[1]
    for dirname in dirs:
        files = os.walk(Path + "\\ " + dirname).next()[2]
        for filename in files:
            if filename.endswith(".txt"):
                GetMeasureValues(Path + "\\ " + dirname +
-->"\\ " + filename, loutputFile)
    loutputFile.close()

def GetMeasureValues(FileName, OutputFile):
    #goes through file and extract Comment of single measurement and Intensity Value, this
-->writes in OutputFile
    lSourceFile = open(FileName, "r")
    lLine = lSourceFile.readline()
    lComment = ""
    lLuminous = ""
    lCt = ""
    while lLine:
        if lLine.startswith(USER_COMMENTS):
            lComment = lLine[len(USER_COMMENTS) : len(lLine) - 1]
        if lLine.startswith(CT):
            lParts = string.split(lLine, ' ')
            lCt = lParts[2]
        if lLine.startswith(LUMINOUS_INTENSITY):
            lParts = string.split(lLine, ' ')
            lLuminous = lParts[3]
            OutputFile.writes(lComment + ';' + lLuminous + ';' +
-->lCt + '\n')
        lLine = lSourceFile.readline()
    lSourceFile.close()
```

```

def ProcessMeasurements(Path):
    #goes through WORK_DIR directories and call ProcessMeasurement for any *.xls files with
-->measure values
    dirs = os.walk(Path).next()[1]
    for dirname in dirs:
        files = os.walk(Path + "\\ " + dirname).next()[2]
        for filename in files:
            if filename.endswith(".xls"):
                ProcessMeasurement(Path + "\\ " + dirname +
-->"\\ " + filename)

def ProcessMeasurement(FileName):
    #creates new xls file with afix PROCESSED_MEASURE_AFIX with the same head of table and
-->rows with first column value between <380,780>
    #other values are processed: if negativ then zero
    lSourceBook = xlrd.open_workbook(FileName) # Open an .xls file
    lSourceSheet = lSourceBook.sheet_by_index(0)

    lDestBook = xlwt.Workbook()
    lDestSheet = lDestBook.add_sheet(lSourceSheet.name)

    for lRow in range(6):
        for lCol in range(lSourceSheet.ncols):
            lDestSheet.write(lRow, lCol, lSourceSheet.cell(lRow,
-->lCol).value)
    #header

    lRowIndex = 6
    for lRow in range(6, lSourceSheet.nrows):
        if lSourceSheet.cell(lRow, 0).value < 380 or lSourceSheet.cell(lRow,
-->0).value > 780:
            continue
        for lCol in range(lSourceSheet.ncols):
            lVal = lSourceSheet.cell(lRow, lCol).value
            if lVal < 0:
                lVal = 0
            lDestSheet.write(lRowIndex, lCol, lVal)
        lRowIndex += 1
    #row values

    for lCol in range(lSourceSheet.ncols):
        lDestSheet.col(lCol).width = 256*20

    lDestBook.save(FileName[:len(FileName) - 4] + PROCESSED_MEASURE_AFIX +
-->FileName[len(FileName) - 4:])

GetValuesIntoFile(MEASURE_FILE, WORK_DIR)
ProcessMeasurements(WORK_DIR)
print "Done"

```


Příloha B-2: Iterace; výpočet korekčních koeficientů na symetrii

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%  
%% ITERACE %%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% @ By Bc. Jiří Dobias, VUT FEKT, Brno, CZECH REPUBLIC, EUROPE, EARTH, MILKY WAY  
%  
  
clc;  
close all;  
clear all;  
  
epsilon = 0.00001;  
k = 1;  
sym0 = 222.1043; %zadaný výsledek  
A = [  
219.3750 220.4450 220.5750 222.0150 223.0350 224.3050 224.9800  
];  
  
sym1 = A(1,7);  
  
%  
if sym0>sym1  
for n=1:1000000000  
sym2 = sym1*k;  
k = k+0.00000001  
if abs(sym0-sym2)<=epsilon  
return;  
end  
end  
end  
  
if sym0<sym1  
for n=1:1000000000  
sym2 = sym1*k;  
k = k-0.00000001  
if abs(sym0-sym2)<=epsilon  
return;  
end  
end  
end
```

Příloha B-3: Tvorba 2D grafu a 3D modelu svítivosti v Matlabu

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% LED XP-E %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% @ By Bc. Jiří Dobiáš, VUT FEKT, Brno, CZECH REPUBLIC, EUROPE, EARTH, MILKY WAY
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc;
close all;
clear all;
% ----- VSTUPNÍ DATA -----
% Naměřné hodnoty svítivosti cd/klm, (I = 0,1A, Ulim = 5V)
% Do následujících matic I1,I2 ... I14 vložíme data svítivosti z Excelu normované na zdroj o světelném
% toku 1000 lm

% XP-E bez optiky
I1 = [
];
% XP-E s C10757
I2 = [
];

% ... Pokračování skriptu s dalšími optikami

% XP-E s FCA10328
I14 = [
];

% I=I2;
I = input('Zadej LED s optikou pro vykreslení! [I1,2...14]:' );

% Symetrická matice podle prvního sloupce
M = [flip1r(I(1:7,2:21)) I];

% ----- VÝPOČTY -----
% 2D graf křivek svítivosti
if I==I1
navez1 = 'Křivky svítivosti XP-E bez optiky';
navez2 = '3D model křivek svítivosti XP-E bez optiky';
end
if I==I2
navez1 = 'Křivky svítivosti XP-E s C10757';
navez2 = '3D model křivek svítivosti XP-E s C10757';
end

% ... Pokračování skriptu s dalšími optikami

if I==I14
navez1 = 'Křivky svítivosti XP-E s FCA10328';
navez2 = '3D model křivek svítivosti XP-E s FCA10328';
end

theta=13/9*pi:1/36*pi:23/9*pi;
figure (15)
set(15,'DefaultAxesColor','none')

% set(15,'Position',[1 1 500 500],'DefaultAxesColor','none','Resize','off')
% polar(0, max(max(M))+5); % rozsah osy
% hold on

polar(theta, M(1,:), '-r')
hold on
polar(theta, M(2,:), '-b')
hold on
polar(theta, M(3,:), '-g')
hold on
polar(theta, M(4,:), '-c')
hold on
polar(theta, M(5,:), '-m')
hold on
```

```

polar(theta, M(6,:), '-y')
hold on
polar(theta, M(7,:), '-k')
hold on

view ([90 90])
legend ('c0-180', 'c15-195', 'c30-210', 'c45-225', 'c60-240', 'c75-255', 'c90-270')
set(gcf, 'color', [1 1 1])
set(legend, 'color', [1 1 1], 'Location', 'EastOutside')

annotation('figure(15)', 'textbox', ...
[0.45 0.09 0.078 0.089], ...
'string', {'\gamma [^\circ]'}, ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontWeight', 'bold', ...
'FontSize', 11, ...
'LineStyle', 'none');
annotation('figure(15)', 'textbox', ...
[0.5395 0.5156 0.14 0.06], ...
'string', {'cd/klm'}, ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontWeight', 'bold', ...
'FontSize', 10, ...
'LineStyle', 'none');
annotation('figure(15)', 'textbox', ...
[0.1 0.9 0.7 0.089], ...
'FontName', 'Arial', ...
'string', {nazev1}, ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontWeight', 'bold', ...
'FontSize', 14, ...
'LineStyle', 'none');
hold off

%__3D graf křivek svítivosti _____

% Měřené poloroviny
P = [
linspace(0, 0, 21)
linspace(15, 15, 21)
linspace(30, 30, 21)
linspace(45, 45, 21)
linspace(60, 60, 21)
linspace(75, 75, 21)
linspace(90, 90, 21)
];

% Úhly v polorovinách
G = [
linspace(0, 100, 21)
linspace(0, 100, 21)
linspace(0, 100, 21)
linspace(0, 100, 21)
linspace(0, 100, 21)
linspace(0, 100, 21)
linspace(0, 100, 21)
];

% Souřadnice (převod z polárních souřadnic na souřadnice X, Y, Z)
X = I.*sin(G*pi/180).*cos(P*pi/180);
Y = I.*sin(G*pi/180).*sin(P*pi/180);
Z = I.*cos(G*pi/180);

X=[X X -X -X];
Y=[Y -Y Y -Y];
Z=[Z Z Z Z];

% A=max(max(B));
% pr; hlednost 3D grafu
vis = 1;

```

```

if l==1
figure (1)
set(gcf, 'color', [1 1 1])
set(1, 'DefaultAxesColor', 'none', 'PaperType', 'A5')
polar (0, max(max(I)));
% view ([0 -12]);
camorbital(0, 75);
hold on
surf(X, Y, Z, 'FaceAlpha', vis, 'EdgeColor', [0 0 0]);
colorbar('South', 'Position', [0.208 0.15 0.6 0.04], 'XAxisLocation', 'top');
% shading ('faceted')
daspect([1 1 1]);
axis off
hold off
title({nazev2}, 'FontSize', 14);
annotation('figure(1)', 'textbox', ...
[0.7 0.47 0.09 0.081], ...
'String', {'\gamma [°]'}, ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontWeight', 'bold', ...
'FontSize', 11, ...
'LineStyle', 'none');
annotation('figure(1)', 'textbox', ...
[0.56 0.79 0.09 0.081], ...
'String', {'cd/klm'}, ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontWeight', 'bold', ...
'FontSize', 10, ...
'LineStyle', 'none');
end

if l==2
figure (2)

% ... Pokracovani skriptu s dalsimi optikami

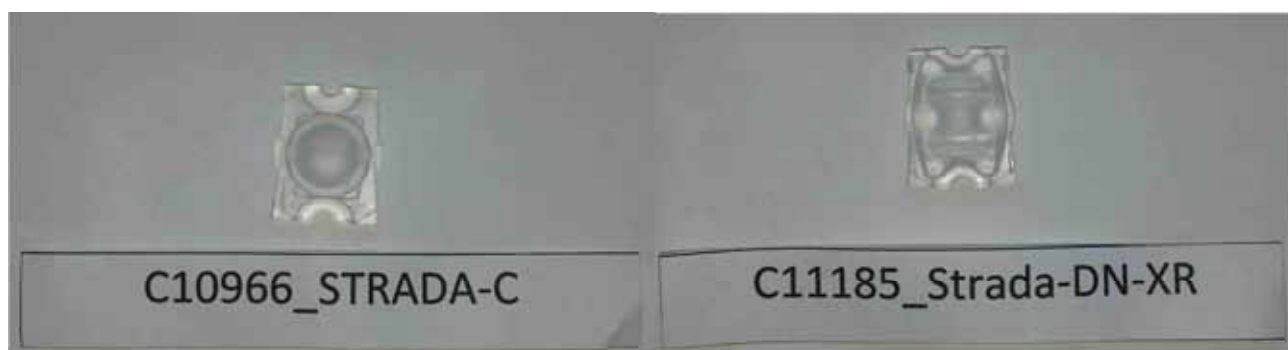
% axis([-A A -A A 0 -A]);
% shading faceted
% shading flat
% shading interp

```

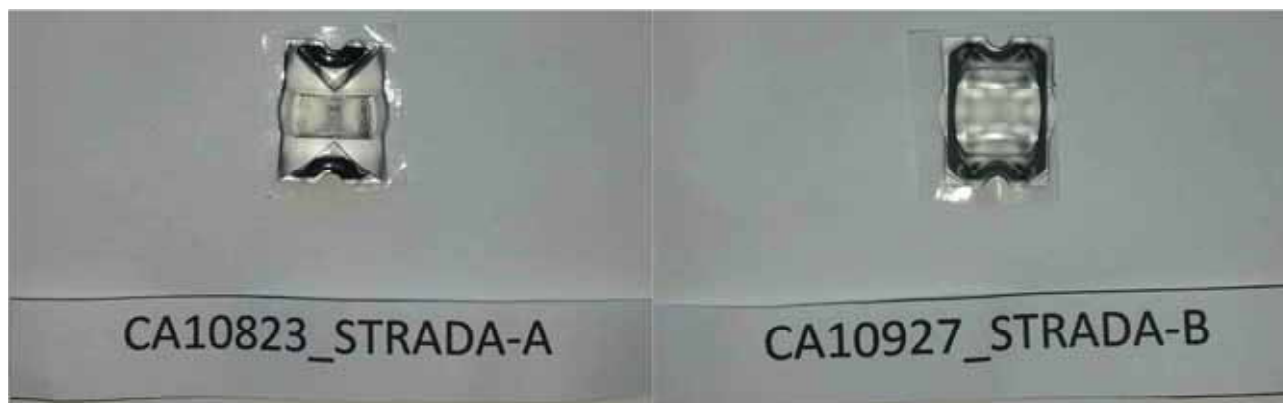
Příloha C-1: Fotografie optických modulů



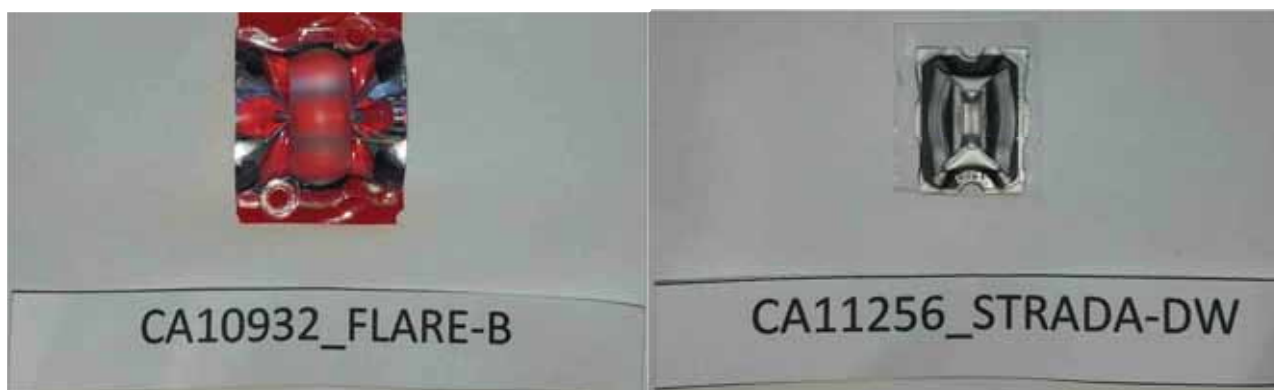
Obr. 1, 2: Optické moduly C10757_Strada-DW-XR (vlevo) a C10924_STRADA-B (vpravo)



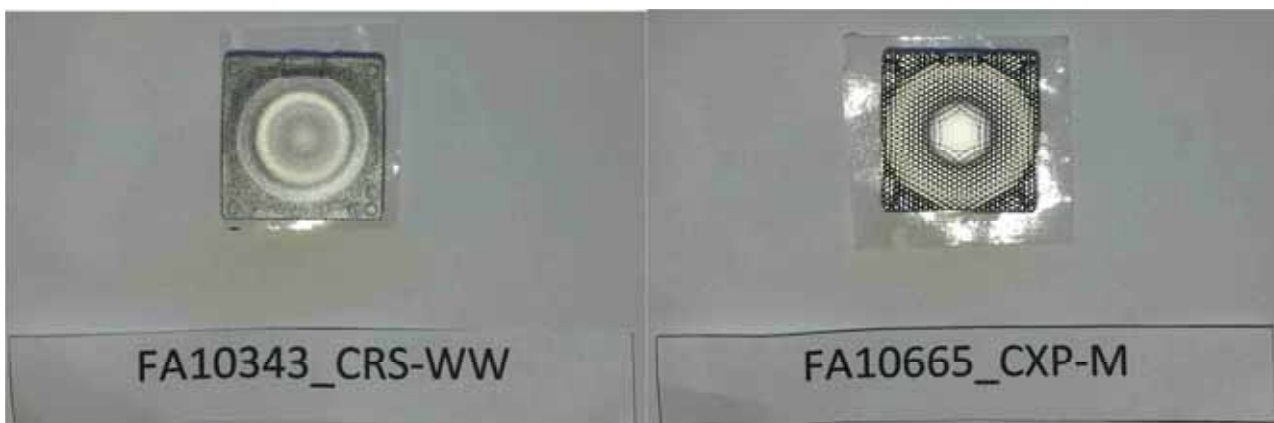
Obr. 3, 4: Optické moduly C10966_STRADA-C (vlevo) a C11185_Strada-DN-XR (vpravo)



Obr. 5, 6: Optické moduly CA10823_STRADA-A (vlevo) a CA10927_STRADA-B (vpravo)



Obr. 7, 8: Optické moduly CA10932_FLARE-B (vlevo) a CA11256_STRADA-DW (vpravo)



Obr. 9, 10: Optické moduly FA10343_CRN-WW (vlevo) a FA10665_CXP-M (vpravo)



Obr. 11, 12: Optické moduly FA10708_CXP-W (vlevo) a FCA10306_CRN-O (vpravo)



Obr. 13: Optický modul FCA10328_CRN-SS

Příloha C-2: Fotografie LED



Obr. 1, 2: LED CREE XP-E (vlevo) a LED CREE XP-G (vpravo)



Obr. 3: LED CREE XT-E

Příloha D-1: Program AvaSoft© 7.3 Full - 2008 Avantes

Irradiance Settings

Calibration | Irradiance Chart | Irradiance Time Series | Auto Adjust Integrationtime Settings

Spectrometer Channel
Master

Hardware setup
Detector type
☒ CC-UV/VIS or Fiber
☐ AvaSphere

Parameter group
☒ Colorimetry
☒ Radiometry
☒ Photometry
☒ Peak Measurement

Graphics
☒ Display Chromaticity Diagram
☒ Display raw A/D Counts Graph
☒ Display Irradiance Graph

Save Settings
 Save experiment results to file:
 C180.txt
 Change Output File...
☒ Save Irradiance Spectrum
☒ Save Irradiance Chart To JPG

Colorimetric Parameters
☒ x ☒ X ☒ u ☒ Dominant Wavelength
☒ y ☒ Y ☒ v ☒ Complementary Dom. Wavelength
☒ z ☒ Z ☒ Color Temperature ☒ Purity

CIE Standard Observer
☒ 2 degrees
☐ 10 degrees

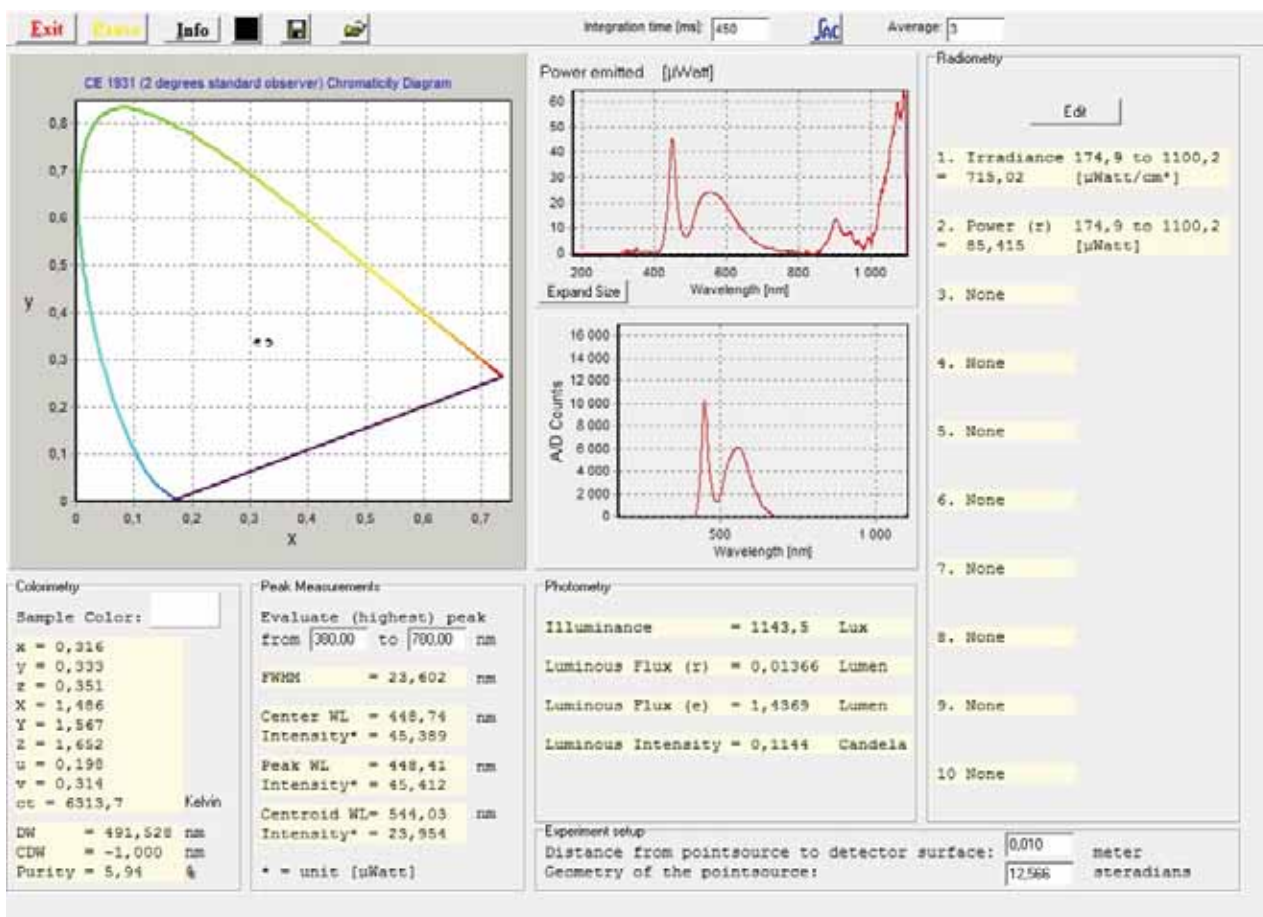
Radiometric Parameters
☒ Calculate Power, Energy, Photon Counts received by detector surface*
☒ Calculate Power and/or Energy emitted by a source** **
 ** Isotropic pointsource assumed. Distance from source to detector can be set while measuring
 * Radiometric Parameters and wavelength range can be selected while measuring

Photopic Parameters
 Received by detector surface ☒ Illuminance [Lux] = [Lumens/m.]
☒ Luminous Flux [Lumens]
 Emitted by a source ☒ Luminous Intensity [Candela]*
☒ Luminous Flux [Lumens]*
 * Isotropic pointsource assumed. Distance from source to detector can be set while measuring

Peak Parameters
☒ Center Wavelength [nm] ☒ Centroid [nm] ☒ Absolute Peak [nm] ☒ FWHM
☒ Amplitude at Center Wavelength ☒ Amplitude at Centroid ☒ Amplitude at Peak

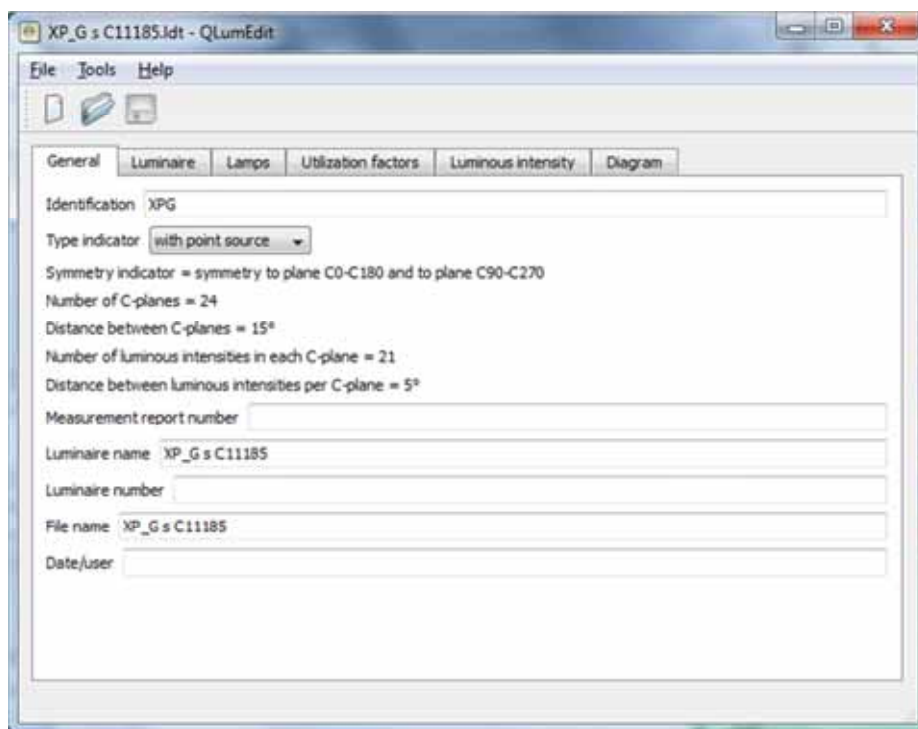
OK Cancel

Obr. 1: LED CREE XP-E (vlevo) a LED CREE XP-G (vpravo)

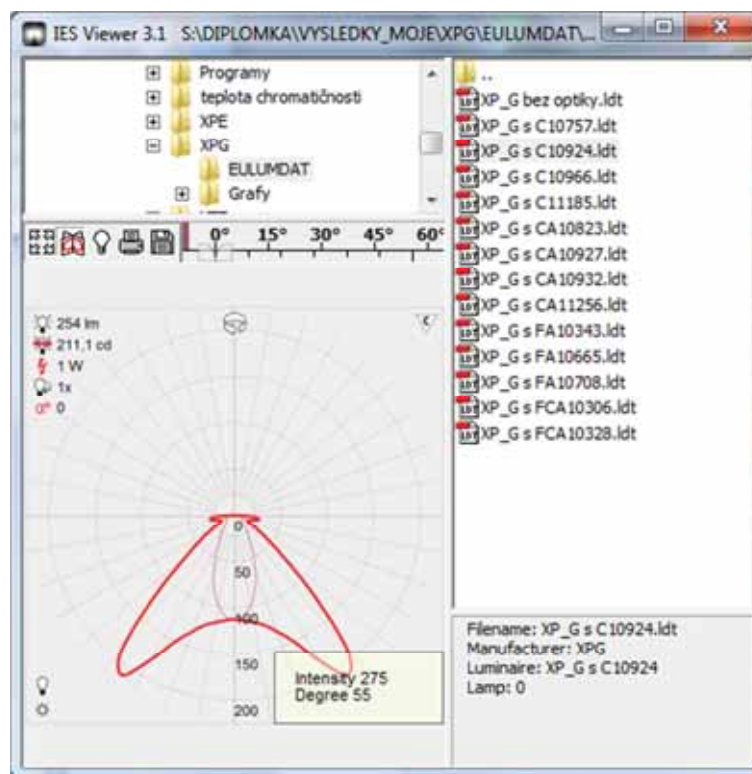


Obr. 2: LED CREE XP-E (vlevo) a LED CREE XP-G (vpravo)

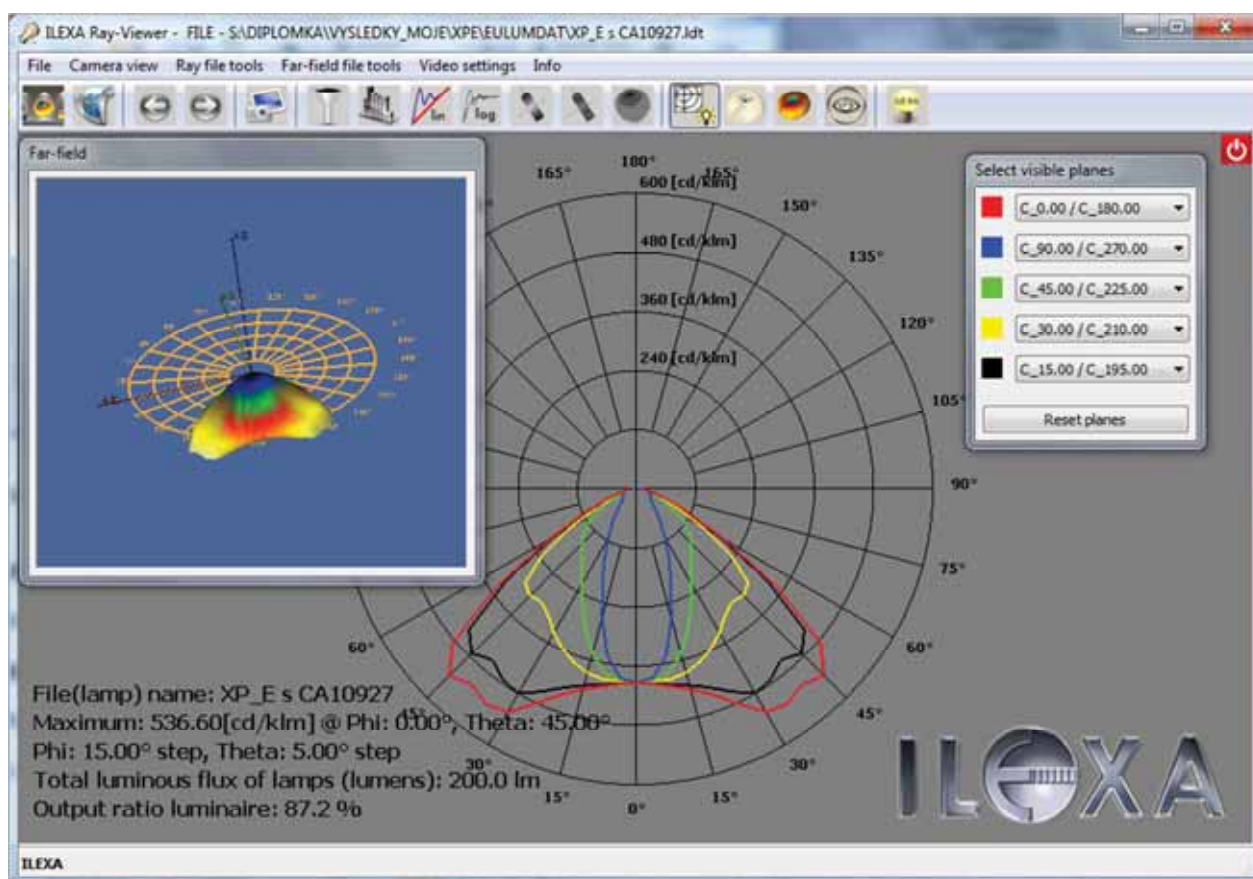
Příloha D-2: Programy pro tvorbu a analýzu souboru EULUMDAT



Obr. 1: Ukázka grafického prostředí programu QLumEdit 0.2.1



Obr. 2: Ukázka grafického prostředí programu IES Viewer 3.1



Obr. 3: Ukázka grafického prostředí programu ILEXA Ray-Viewer 2013

Příloha E-1: Přehled naměřených a vypočítaných parametrů LED s optikami pro proud 0,1 A dle typu LED

Tab. 1: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XP-E s optikami pro proud 0,1 A

XP-E (I = 0,1 A)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	XPE	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
Příkon P1 [W]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Sv. tok Φ [lm]	35,67	33,33	32,02	32,94	31,34	32,52	31,22	29,74	32,73	23,58	29,46	27,11	28,79	30,94
Měrný výkon Mz [lm/W]	125,90	117,65	113,03	116,28	110,61	114,79	110,18	104,97	115,53	83,22	103,98	95,69	101,60	109,21
Účinnost η [%]	18,43	17,22	16,55	17,02	16,19	16,81	16,13	15,37	16,92	12,19	15,22	14,01	14,88	15,99
Sv. tok zdroje Φzd [lm]	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67	35,67
Účinnost opt ηopt [%]		93,44	89,77	92,35	87,85	91,17	87,51	83,37	91,76	66,10	82,59	76,00	80,70	86,74

Tab. 2: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XP-G s optikami pro proud 0,1 A

XP-G (I = 0,1 A)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	XPG	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
Příkon P1 [W]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Sv. tok Φ [lm]	35,01	31,24	31,18	31,92	31,04	30,45	29,86	32,85	30,99	23,57	29,16	27,25	28,30	30,69
Měrný výkon Mz [lm/W]	126,89	113,22	113,03	115,70	112,51	110,35	108,24	119,07	112,33	85,42	105,70	98,76	102,58	111,22
Účinnost η [%]	18,58	16,58	16,55	16,94	16,47	16,16	15,85	17,43	16,45	12,51	15,48	14,46	15,02	16,28
Sv. tok zdroje Φzd [lm]	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01	35,01
Účinnost opt ηopt [%]		89,23	89,08	91,19	88,67	86,97	85,31	93,84	88,53	67,32	83,30	77,84	80,84	87,66

Tab. 3: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XT-E s optikami pro proud 0,1 A

XT-E (I = 0,1 A)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	XTE	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
Příkon P1 [W]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Sv. tok Φ [lm]	37,01	32,32	32,05	33,59	31,34	30,67	30,15	32,26	32,36	23,80	30,24	26,58	29,19	29,57
Měrný výkon Mz [lm/W]	131,76	115,06	114,11	119,60	111,56	109,20	107,32	114,85	115,19	84,74	107,64	94,62	103,92	105,26
Účinnost η [%]	19,29	16,85	16,71	17,51	16,33	15,99	15,71	16,82	16,87	12,41	15,76	13,85	15,22	15,41
Sv. tok zdroje Φzd [lm]	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01	37,01
Účinnost opt ηopt [%]		87,33	86,61	90,77	84,67	82,88	81,46	87,17	87,43	64,32	81,69	71,81	78,87	79,89

Příloha E-2: Přehled naměřených a vypočítaných parametrů LED s optikami pro proud 1 A dle typu LED

Tab. 1: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XP-E s optikami pro proud 1 A

XP-E (I = 1 A)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	XPE	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
Příkon P1 [W]	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Sv. tok Φ [lm]	233,92	215,21	203,05	215,83	200,54	212,38	199,70	200,59	212,60	160,60	191,59	194,81	185,32	201,44
Měrný výkon Mz [lm/W]	68,73	63,24	59,66	63,42	58,92	62,40	58,68	58,94	62,47	47,19	56,29	57,24	54,45	59,19
Účinnost η [%]	10,06	9,26	8,74	9,29	8,63	9,14	8,59	8,63	9,15	6,91	8,24	8,38	7,97	8,67
Sv. tok zdroje Φzsd [lm]	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92	233,92
Účinnost opt η _{opt} [%]		92,00	86,81	92,27	85,73	90,79	85,37	85,75	90,89	68,66	81,90	83,28	79,22	86,12

Tab. 2: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XP-G s optikami pro proud 1 A

XP-G (I = 1 A)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	XPG	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
Příkon P1 [W]	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24
Sv. tok Φ [lm]	286,18	251,04	253,55	261,39	253,30	245,46	244,82	267,18	249,73	192,08	234,64	220,84	228,76	247,28
Měrný výkon Mz [lm/W]	88,33	77,48	78,26	80,68	78,18	75,76	75,56	82,46	77,08	59,28	72,42	68,16	70,61	76,32
Účinnost η [%]	12,93	11,34	11,46	11,81	11,45	11,09	11,06	12,07	11,29	8,68	10,60	9,98	10,34	11,17
Sv. tok zdroje Φzsd [lm]	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18	286,18
Účinnost opt η _{opt} [%]		87,72	88,60	91,34	88,51	85,77	85,55	93,36	87,26	67,12	81,99	77,17	79,94	86,41

Tab. 3: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XT-E s optikami pro proud 1 A

XT-E (I = 1 A)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	XTE	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
Příkon P1 [W]	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
Sv. tok Φ [lm]	255,86	227,89	226,64	242,07	220,23	210,69	215,50	235,41	219,70	169,57	211,82	190,97	200,72	220,27
Měrný výkon Mz [lm/W]	73,74	65,67	65,32	69,76	63,47	60,72	62,10	67,84	63,31	48,87	61,04	55,04	57,85	63,48
Účinnost η [%]	10,80	9,62	9,56	10,21	9,29	8,89	9,09	9,93	9,27	7,15	8,94	8,06	8,47	9,29
Sv. tok zdroje Φzsd [lm]	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86	255,86
Účinnost opt η _{opt} [%]		89,07	88,58	94,61	86,08	82,34	84,22	92,01	85,87	66,27	82,79	74,64	78,45	86,09

Příloha E-3: Přehled naměřených a vypočítaných parametrů LED s optikami pro proud 0,1 A i 1 A dle parametru

Tab. 1, 2, 3, 4: Naměřené a vypočítané charakteristické parametry LED XP-E, XP-G a XT-E s optikami pro proud 0,1 A i 1 A ve srovnání dle parametrů (shora): Světelný tok, měrný výkon, účinnost LED, účinnost optického modulu.

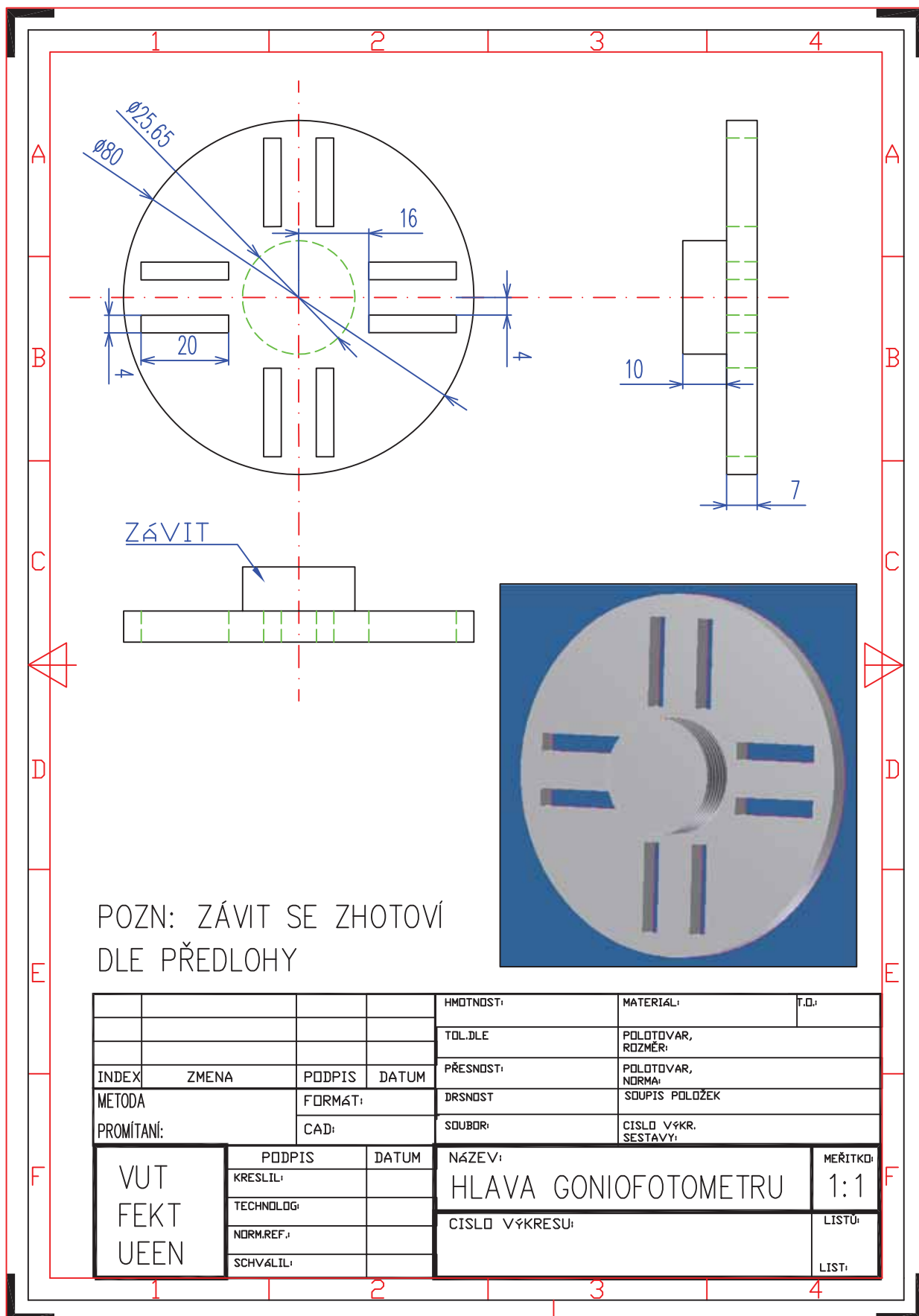
Sv. tok Φ [lm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	bez opt	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
XP-E (I = 0,1 A)	35,67	33,33	32,02	32,94	31,34	32,52	31,22	29,74	32,73	23,58	29,46	27,11	28,79	30,94
XP-G (I = 0,1 A)	35,01	31,24	31,18	31,92	31,04	30,45	29,86	32,85	30,99	23,57	29,16	27,25	28,30	30,69
XT-E (I = 0,1 A)	37,01	32,32	32,05	33,59	31,34	30,67	30,15	32,26	32,36	23,80	30,24	26,58	29,19	29,57
XP-E (I = 1 A)	233,92	215,21	203,05	215,83	200,54	212,38	199,70	200,59	212,60	160,60	191,59	194,81	185,32	201,44
XP-G (I = 1 A)	286,18	251,04	253,55	261,39	253,30	245,46	244,82	267,18	249,73	192,08	234,64	220,84	228,76	247,28
XT-E (I = 1 A)	255,86	227,89	226,64	242,07	220,23	210,69	215,50	235,41	219,70	169,57	211,82	190,97	200,72	220,27

Měrný výkon Mz [lm/W]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	bez opt	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
XP-E (I = 0,1 A)	125,90	117,65	113,03	116,28	110,61	114,79	110,18	104,97	115,53	83,22	103,98	95,69	101,60	109,21
XP-G (I = 0,1 A)	126,89	113,22	113,03	115,70	112,51	110,35	108,24	119,07	112,33	85,42	105,70	98,76	102,58	111,22
XT-E (I = 0,1 A)	131,76	115,06	114,11	119,60	111,56	109,20	107,32	114,85	115,19	84,74	107,64	94,62	103,92	105,26
XP-E (I = 1 A)	68,73	63,24	59,66	63,42	58,92	62,40	58,68	58,94	62,47	47,19	56,29	57,24	54,45	59,19
XP-G (I = 1 A)	88,33	77,48	78,26	80,68	78,18	75,76	75,56	82,46	77,08	59,28	72,42	68,16	70,61	76,32
XT-E (I = 1 A)	73,74	65,67	65,32	69,76	63,47	60,72	62,10	67,84	63,31	48,87	61,04	55,04	57,85	63,48

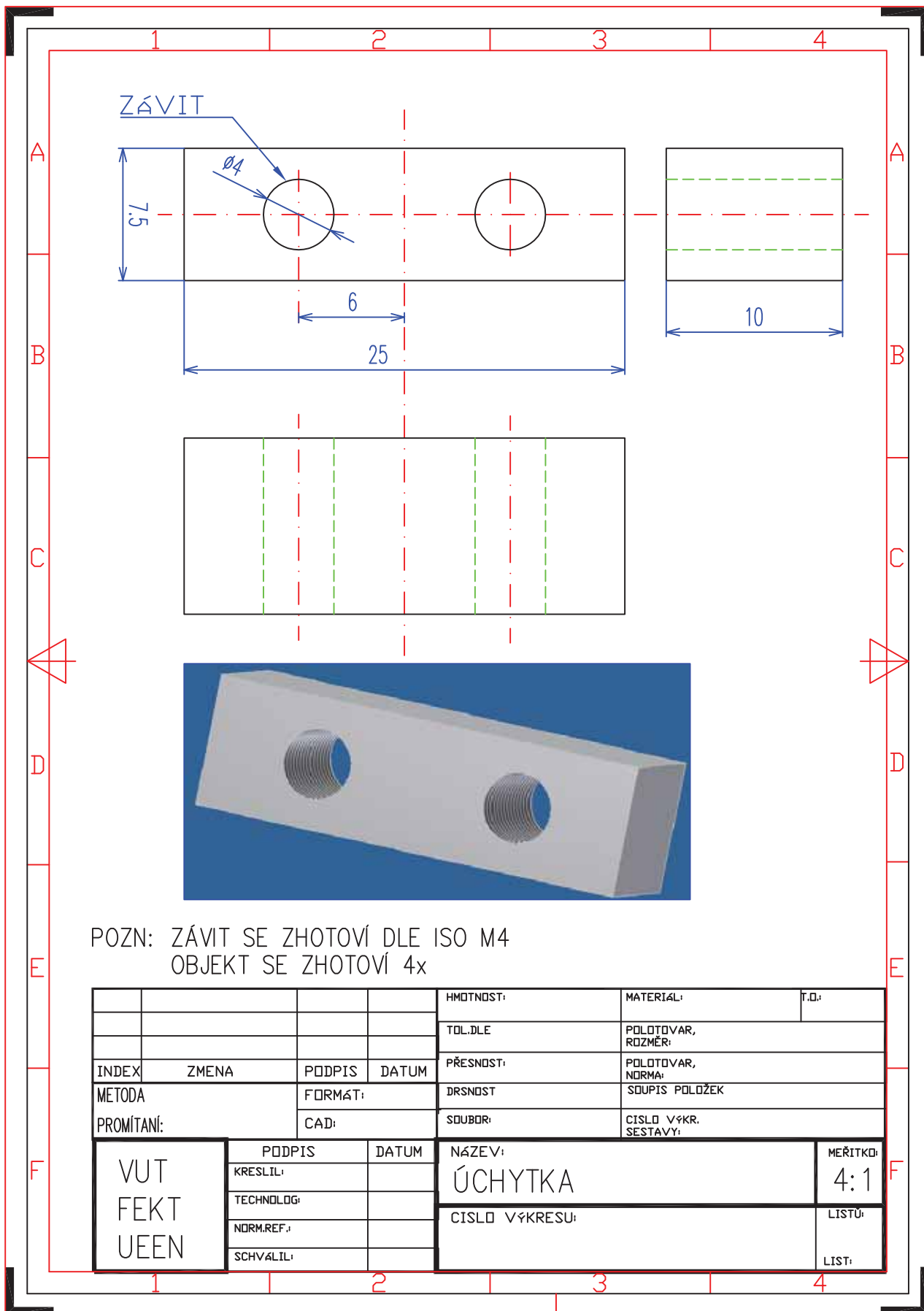
Účinnost η [%]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	bez opt	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
XP-E (I = 0,1 A)	18,43	17,22	16,55	17,02	16,19	16,81	16,13	15,37	16,92	12,19	15,22	14,01	14,88	15,99
XP-G (I = 0,1 A)	18,58	16,58	16,55	16,94	16,47	16,16	15,85	17,43	16,45	12,51	15,48	14,46	15,02	16,28
XT-E (I = 0,1 A)	19,29	16,85	16,71	17,51	16,33	15,99	15,71	16,82	16,87	12,41	15,76	13,85	15,22	15,41
XP-E (I = 1 A)	10,06	9,26	8,74	9,29	8,63	9,14	8,59	8,63	9,15	6,91	8,24	8,38	7,97	8,67
XP-G (I = 1 A)	12,93	11,34	11,46	11,81	11,45	11,09	11,06	12,07	11,29	8,68	10,60	9,98	10,34	11,17
XT-E (I = 1 A)	10,80	9,62	9,56	10,21	9,29	8,89	9,09	9,93	9,27	7,15	8,94	8,06	8,47	9,29

Účinnost opt η _{opt} [%]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	bez opt	C10757	C10924	C10966	C11185	CA10823	CA10927	CA10932	CA11256	FA10343	FA10665	FA10708	FCA10306	FCA10328
XP-E (I = 0,1 A)	-	93,44	89,77	92,35	87,85	91,17	87,51	83,37	91,76	66,10	82,59	76,00	80,70	86,74
XP-G (I = 0,1 A)	-	89,23	89,08	91,19	88,67	86,97	85,31	93,84	88,53	67,32	83,30	77,84	80,84	87,66
XT-E (I = 0,1 A)	-	87,33	86,61	90,77	84,67	82,88	81,46	87,17	87,43	64,32	81,69	71,81	78,87	79,89
XP-E (I = 1 A)	-	92,00	86,81	92,27	85,73	90,79	85,37	85,75	90,89	68,66	81,90	83,28	79,22	86,12
XP-G (I = 1 A)	-	87,72	88,60	91,34	88,51	85,77	85,55	93,36	87,26	67,12	81,99	77,17	79,94	86,41
XT-E (I = 1 A)	-	89,07	88,58	94,61	86,08	82,34	84,22	92,01	85,87	66,27	82,79	74,64	78,45	86,09
VÝROBCE*	-	92	93	93	92	93	93	93	92	N/A*	82 - 83	77 - 79	78	N/A

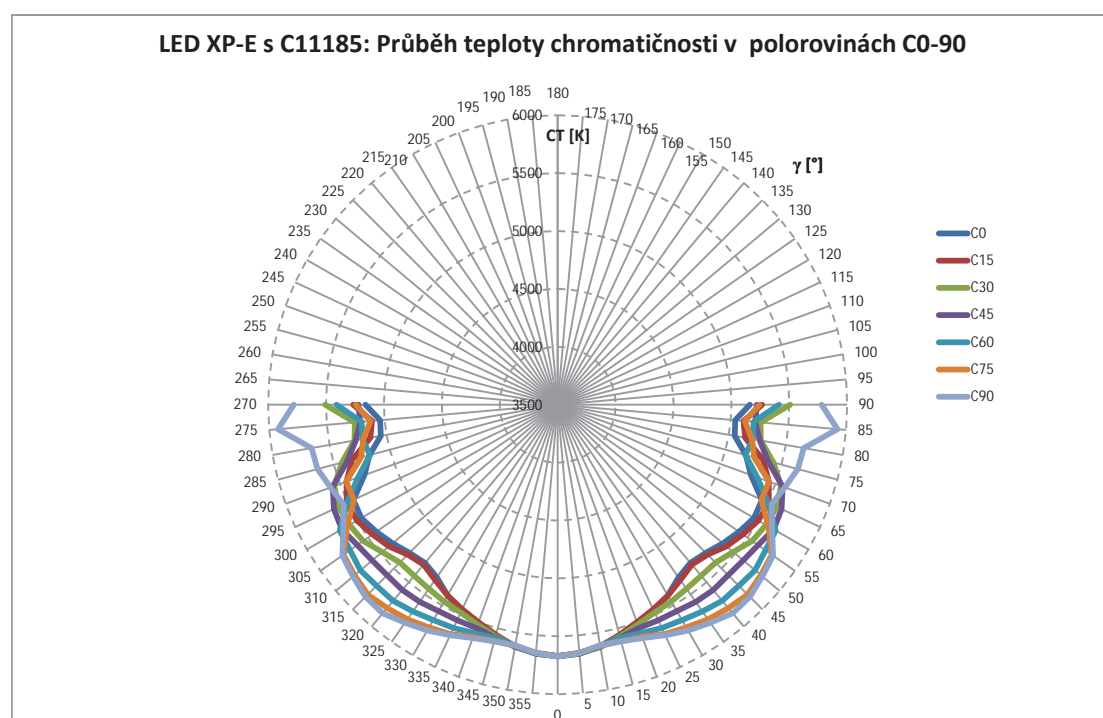
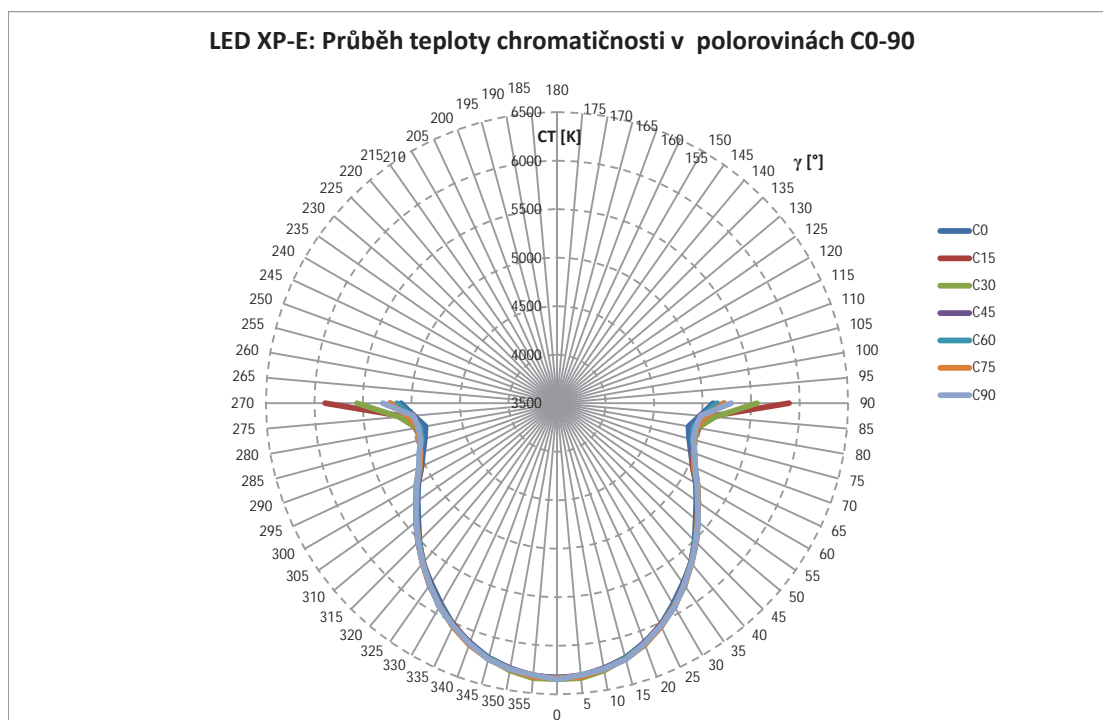
Příloha F-1: Návrh hlavy goniofotometru



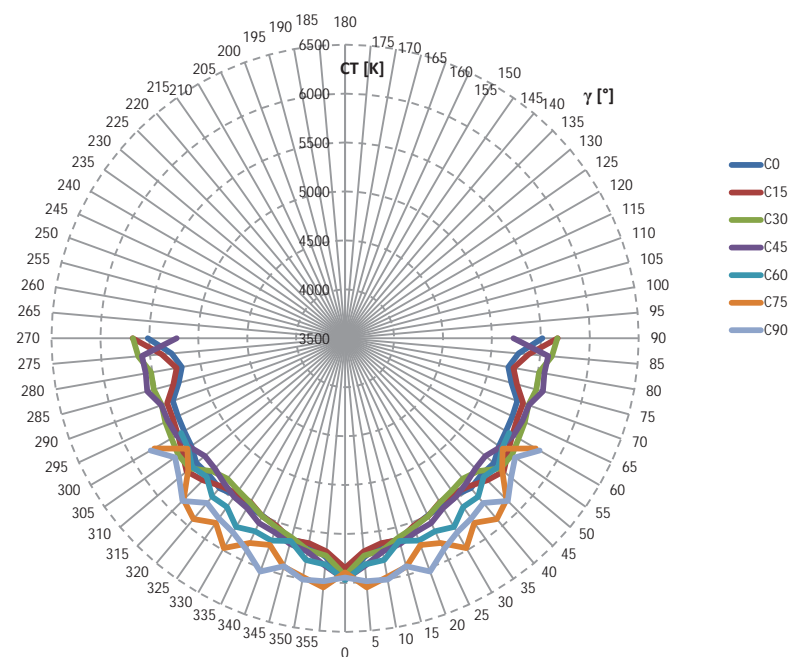
Příloha F-2: Návrh úchytky pro hlavu goniofotometru



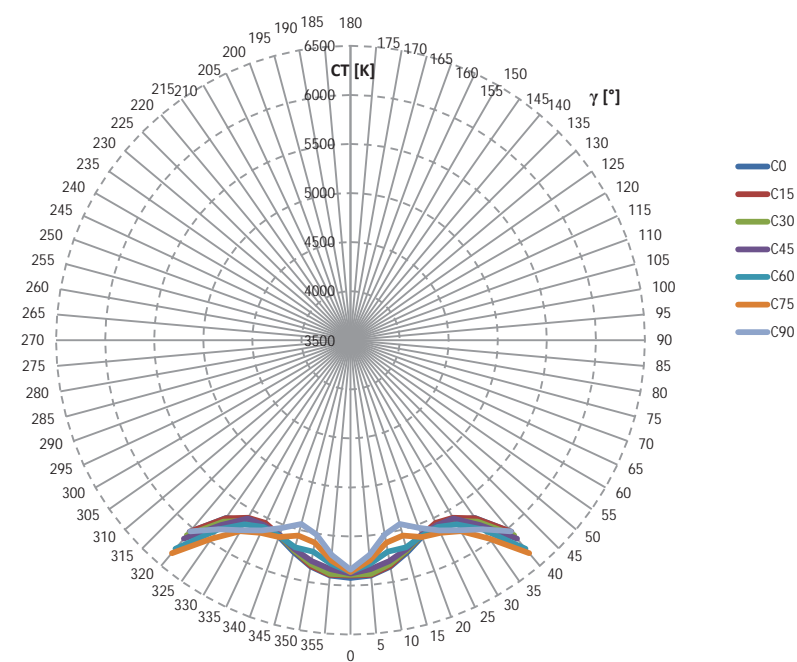
Příloha G-1: Teploty chromatičnosti LED XP-E s vybranými optickými moduly



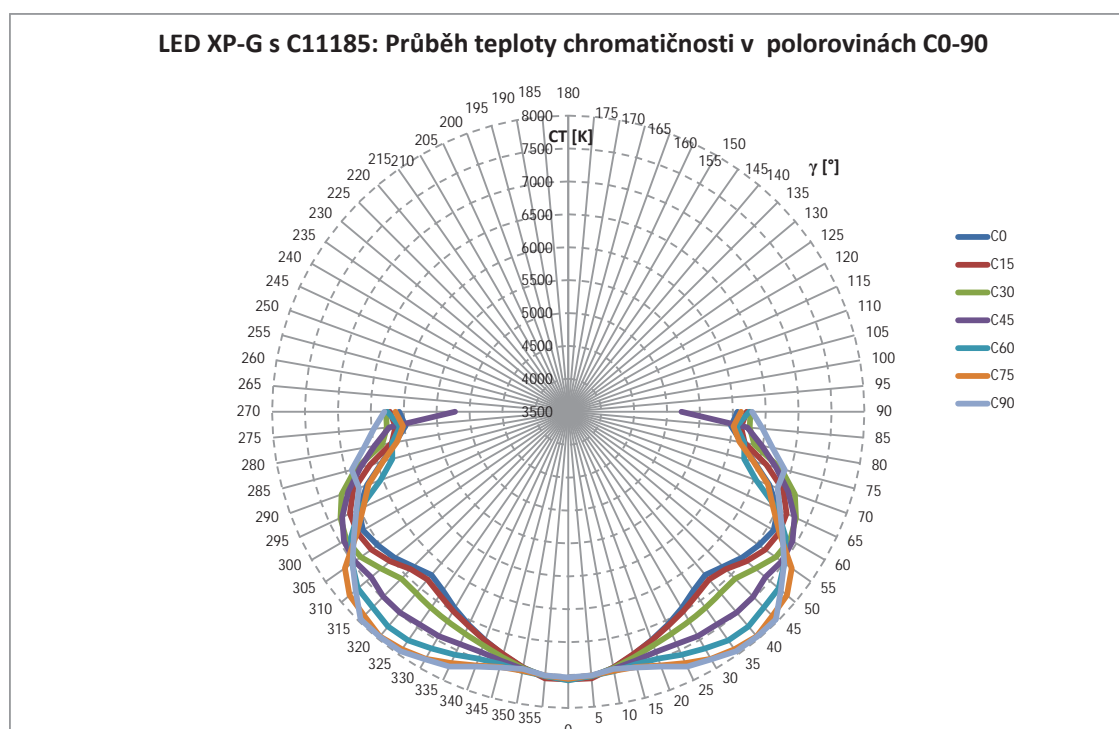
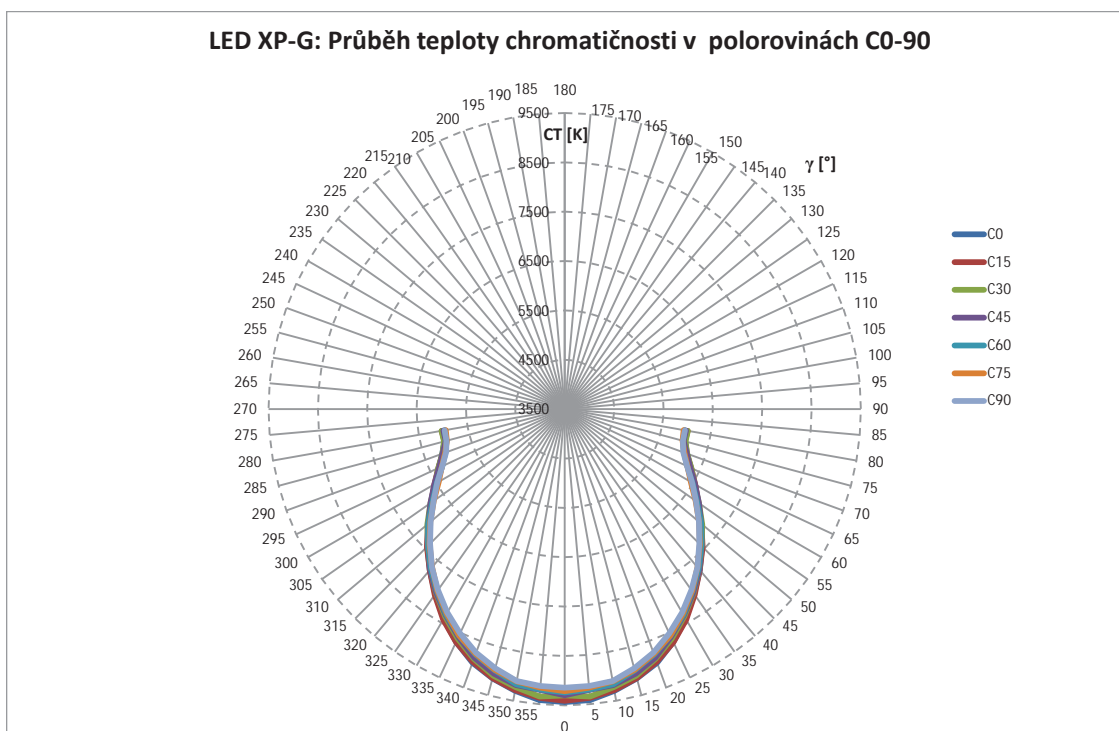
LED XP-E s CA11256: Průběh teploty chromatičnosti v polorovinách C0-90



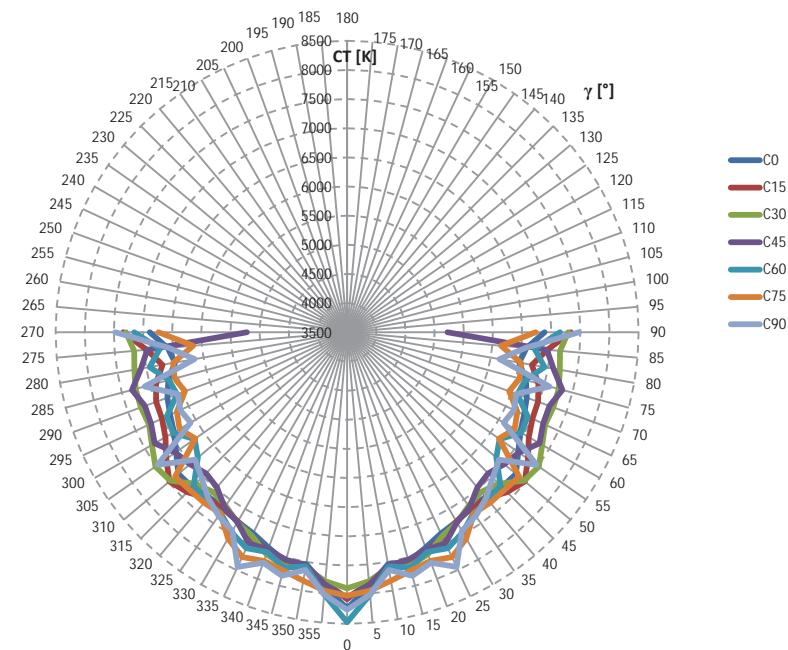
LED XP-E s FA10708: Průběh teploty chromatičnosti v polorovinách C0-90



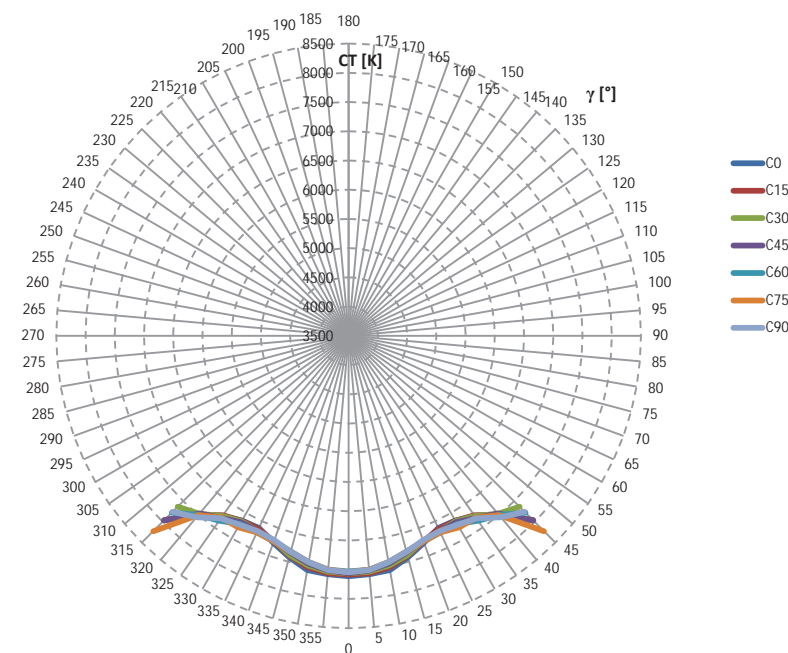
Příloha G-2: Teploty chromatičnosti LED XP-G s vybranými optickými moduly



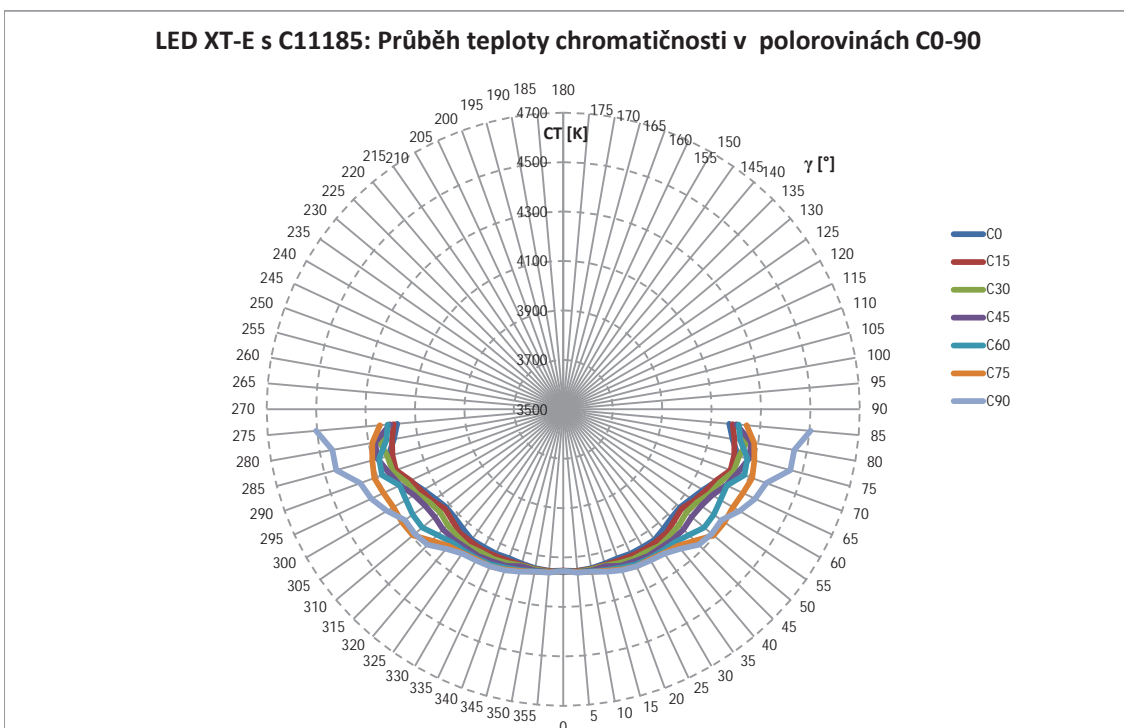
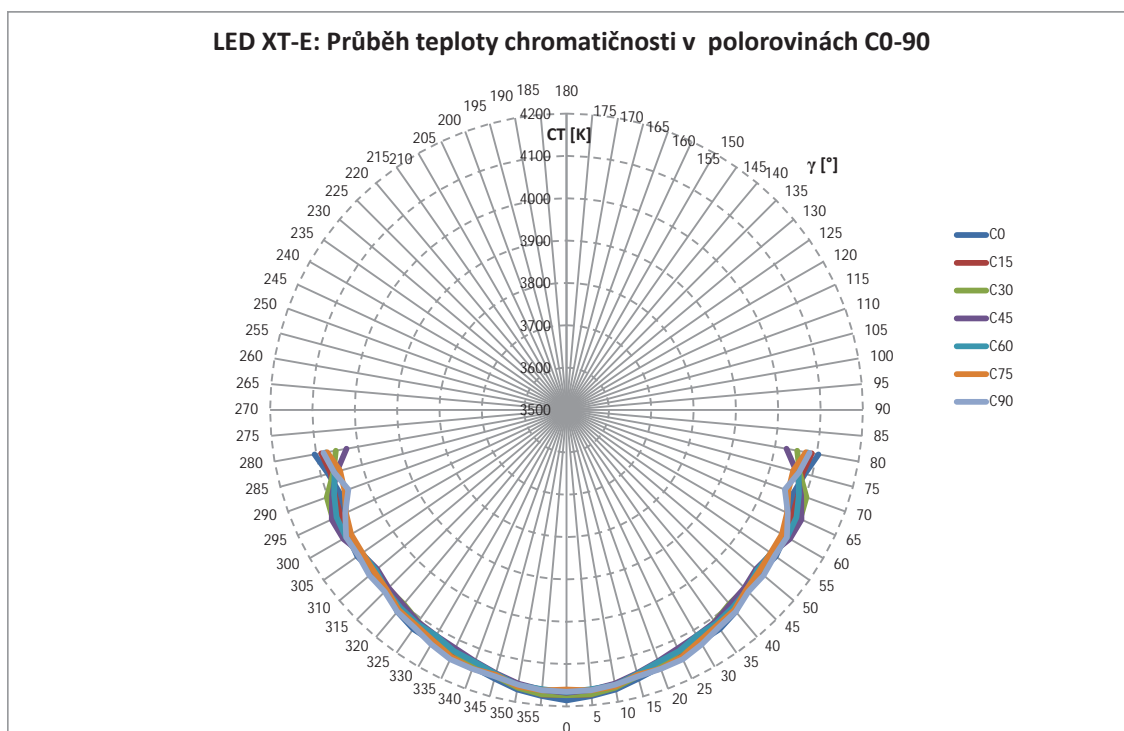
LED XP-G s CA11256: Průběh teploty chromatičnosti v polorovinách C0-90



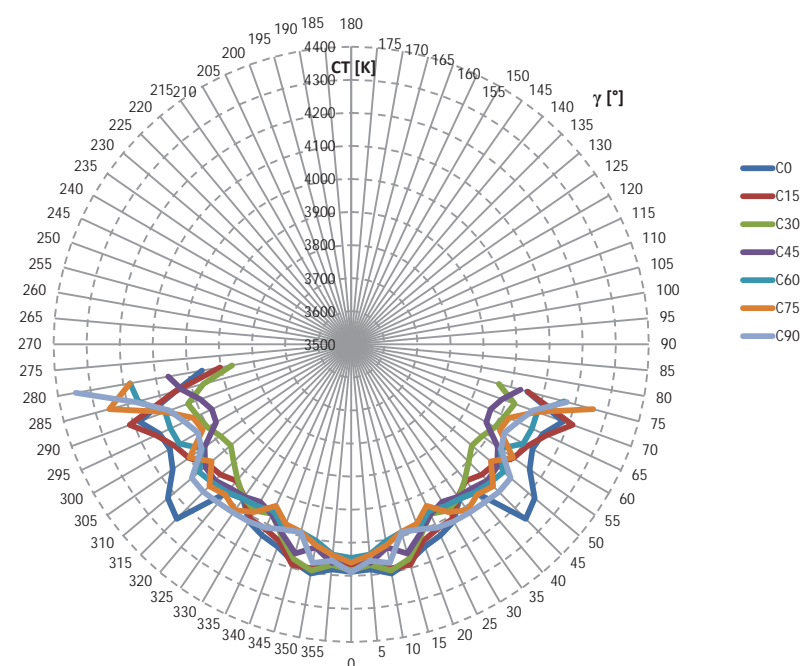
LED XP-G s FA10708: Průběh teploty chromatičnosti v polorovinách C0-90



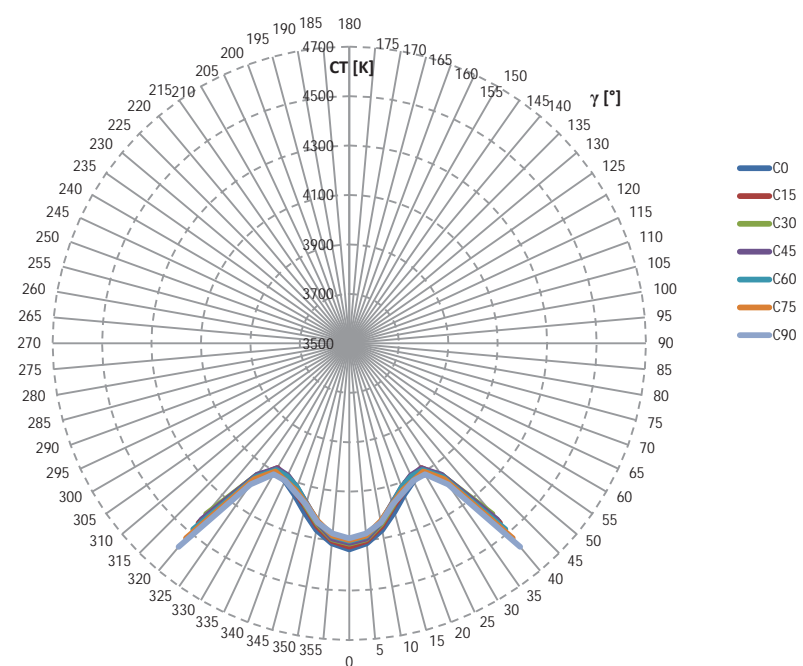
Příloha G-3: Teploty chromatičnosti LED XT-E s vybranými optickými moduly



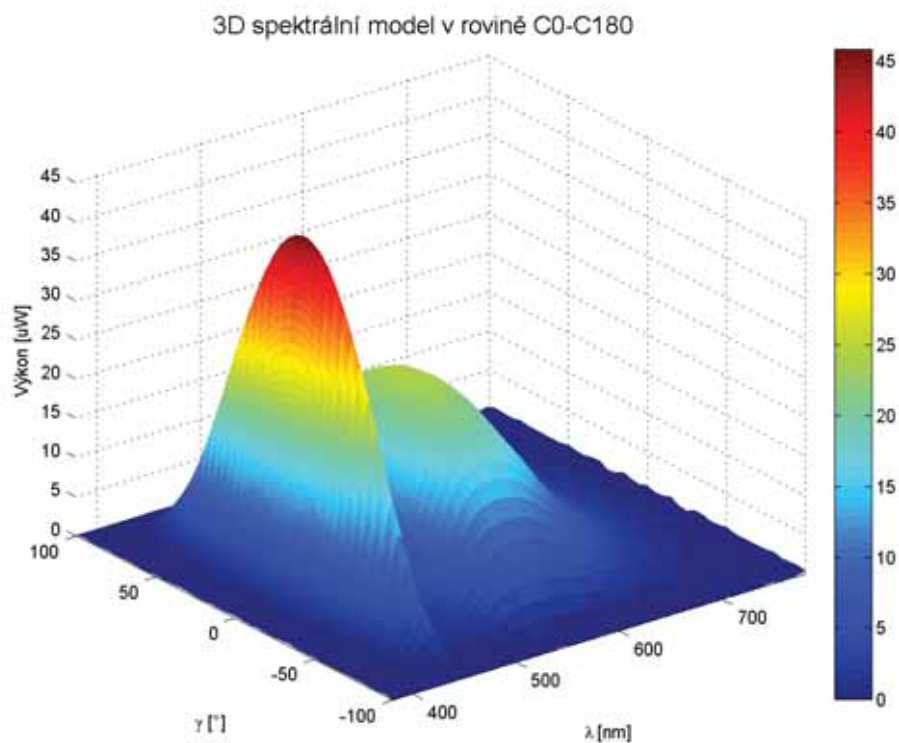
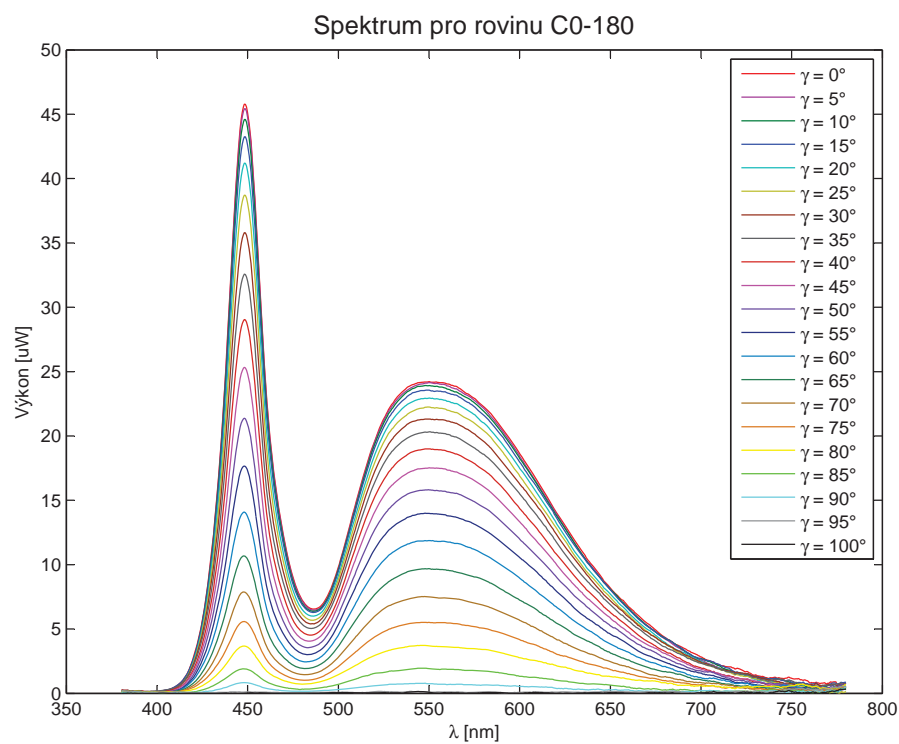
LED XT-E s CA11256: Průběh teploty chromatičnosti v polorovínách C0-90



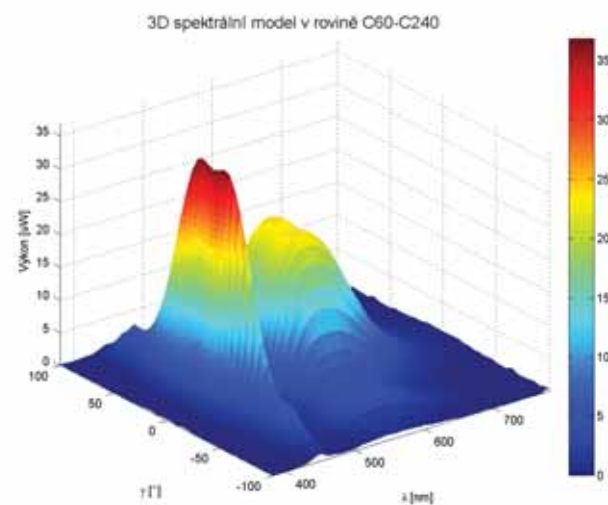
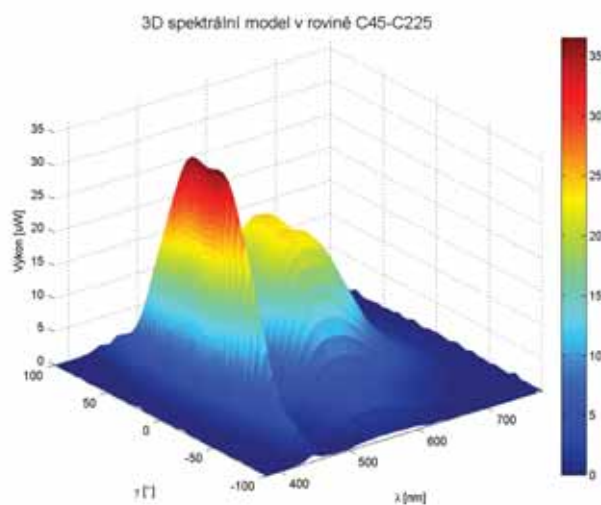
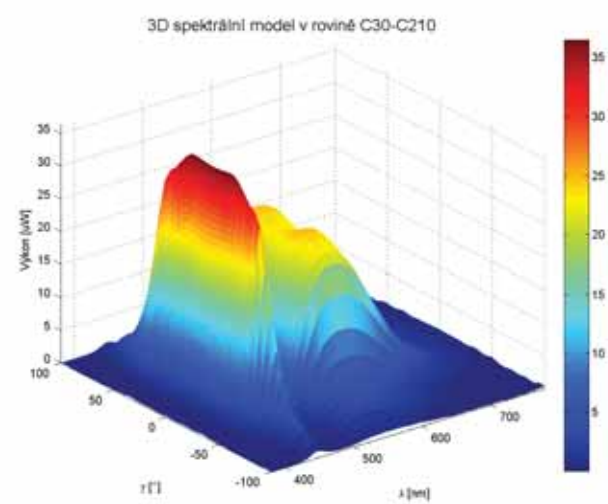
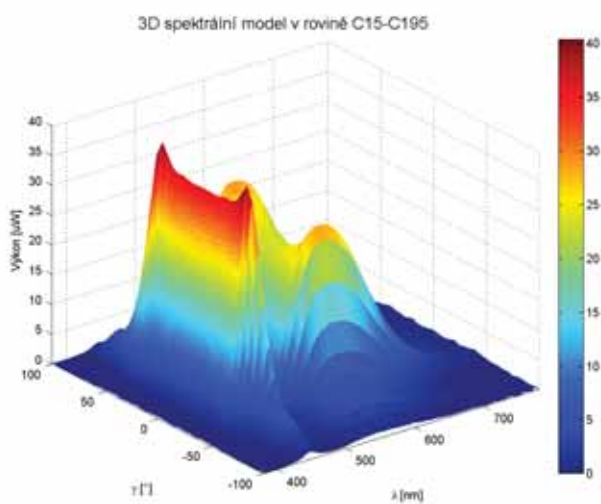
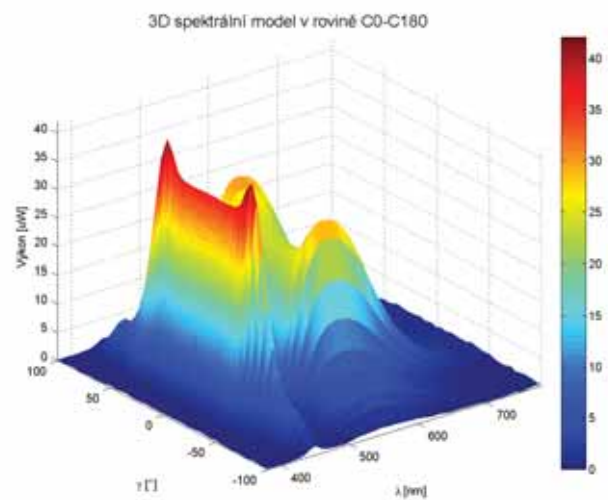
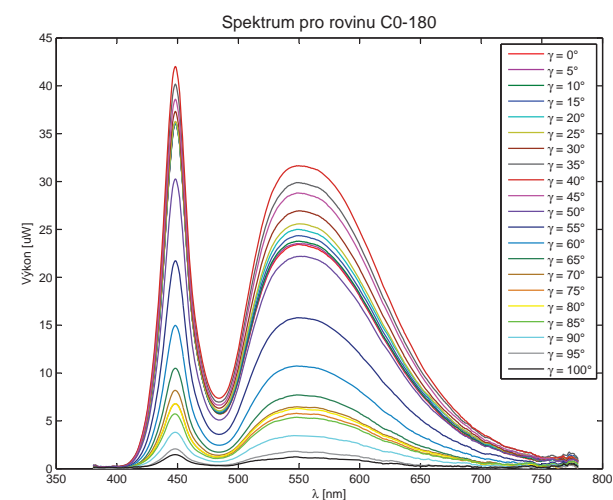
LED XT-E s FA10708: Průběh teploty chromatičnosti v polorovínách C0-90



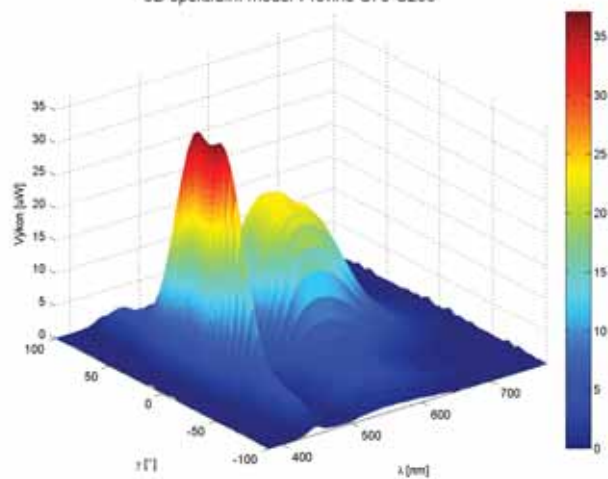
Příloha H-1: Spektrální průběh LED XP-E



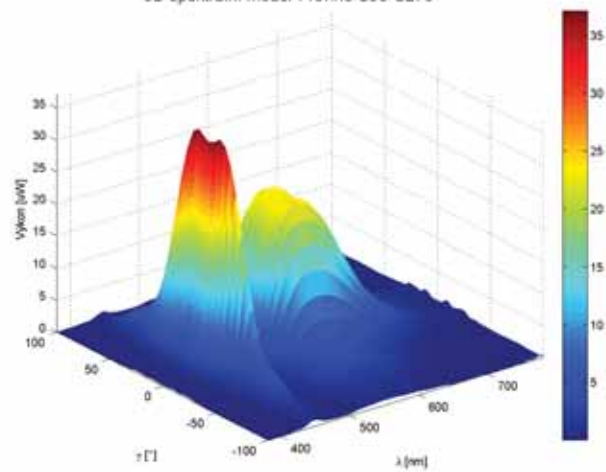
Příloha H-2: Spektrální průběhy LED XP-E s optickým modulem C11185



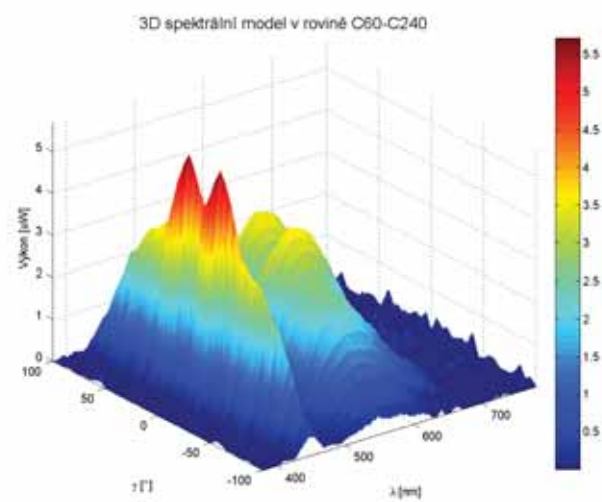
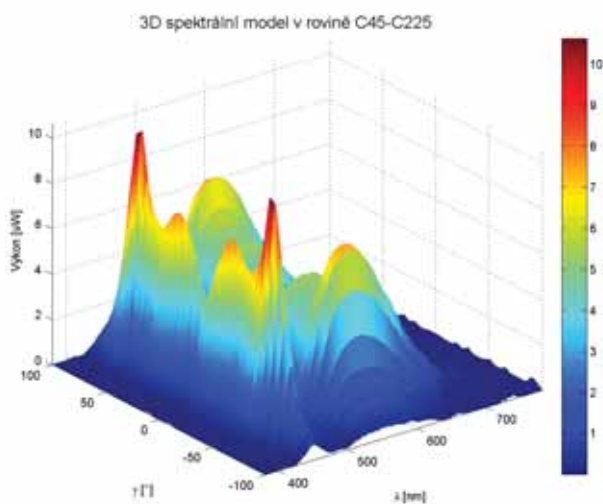
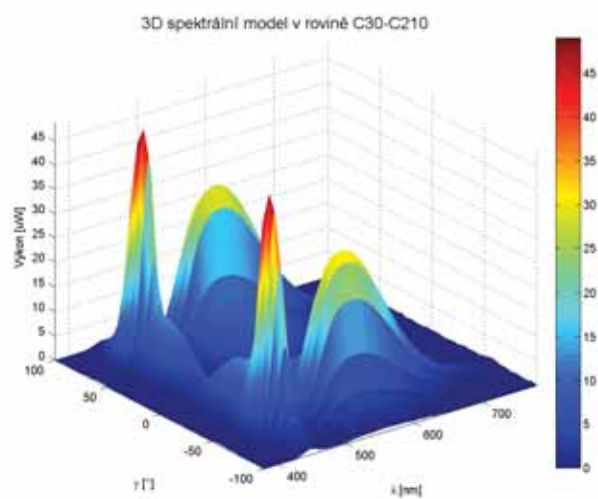
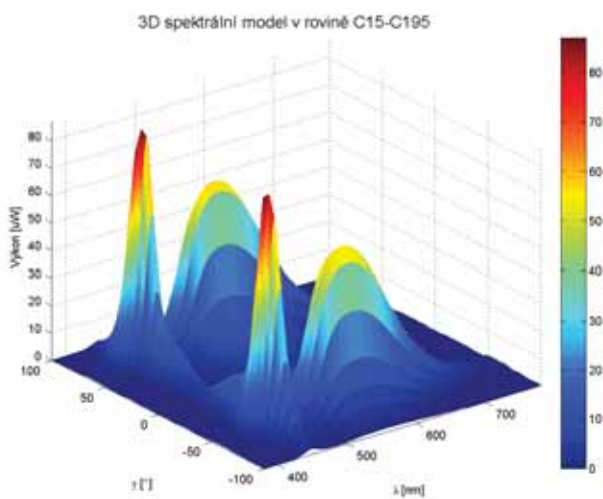
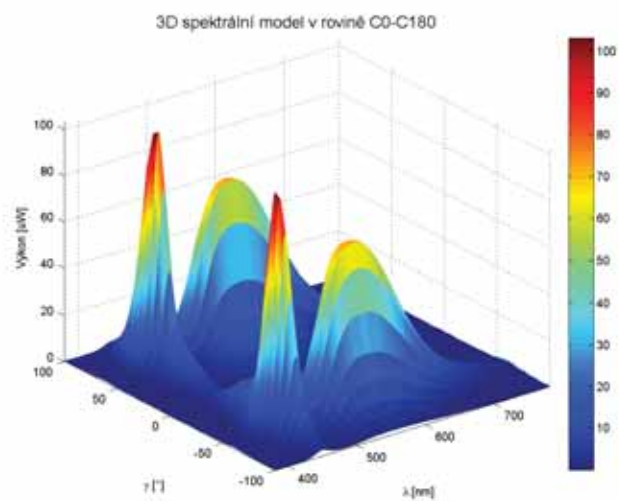
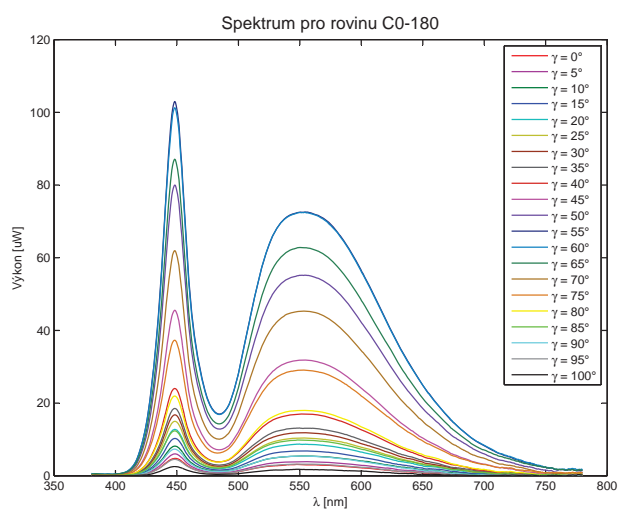
3D spektrální model v rovině C75-C255

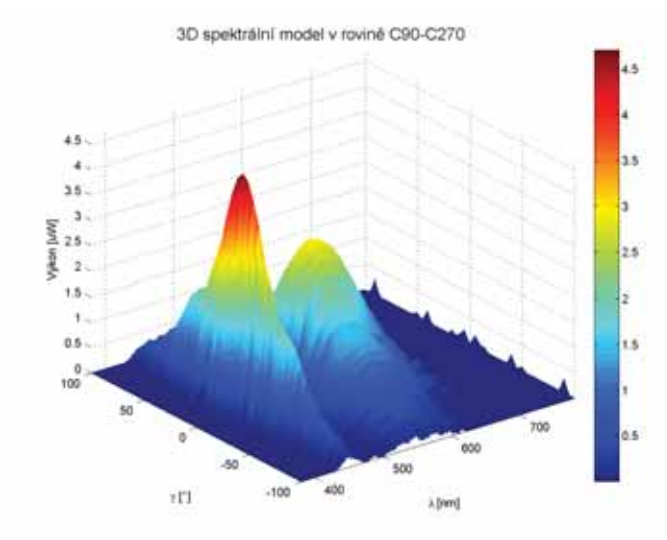
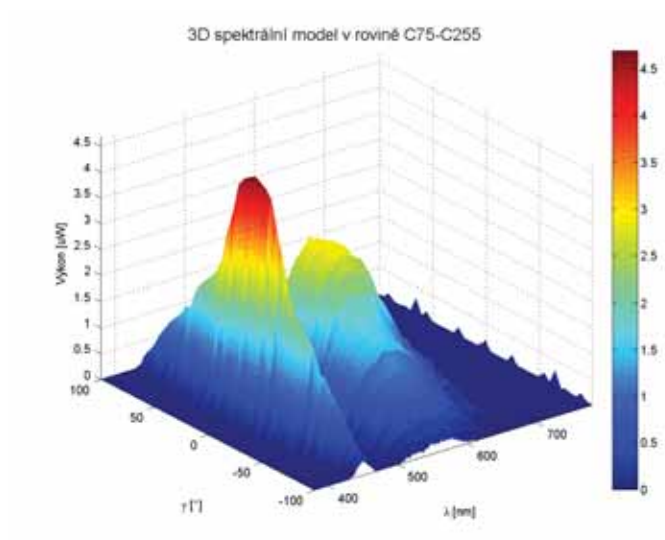


3D spektrální model v rovině C90-C270

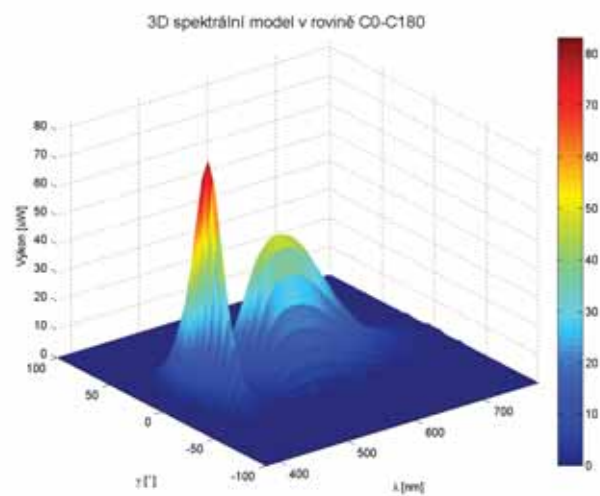
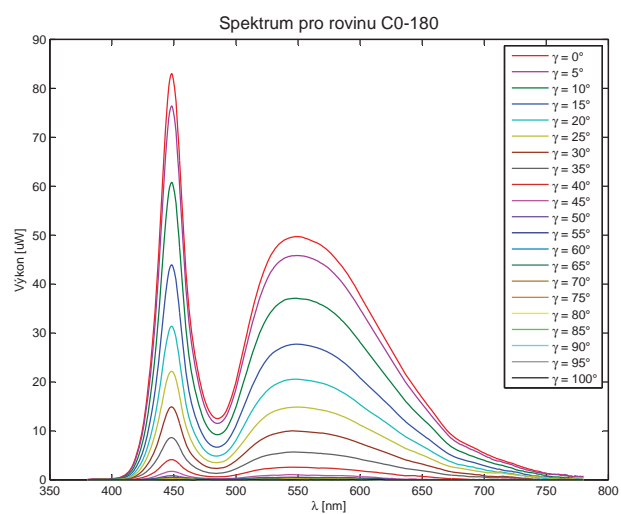


Příloha H-3: Spektrální průběhy LED XP-E s optickým modulem CA11256

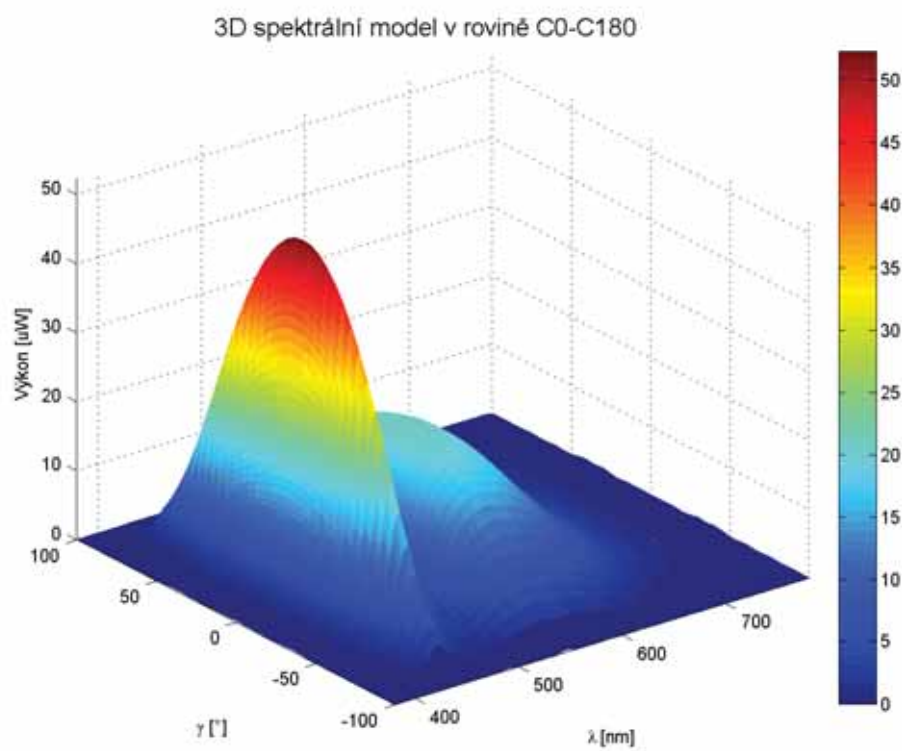
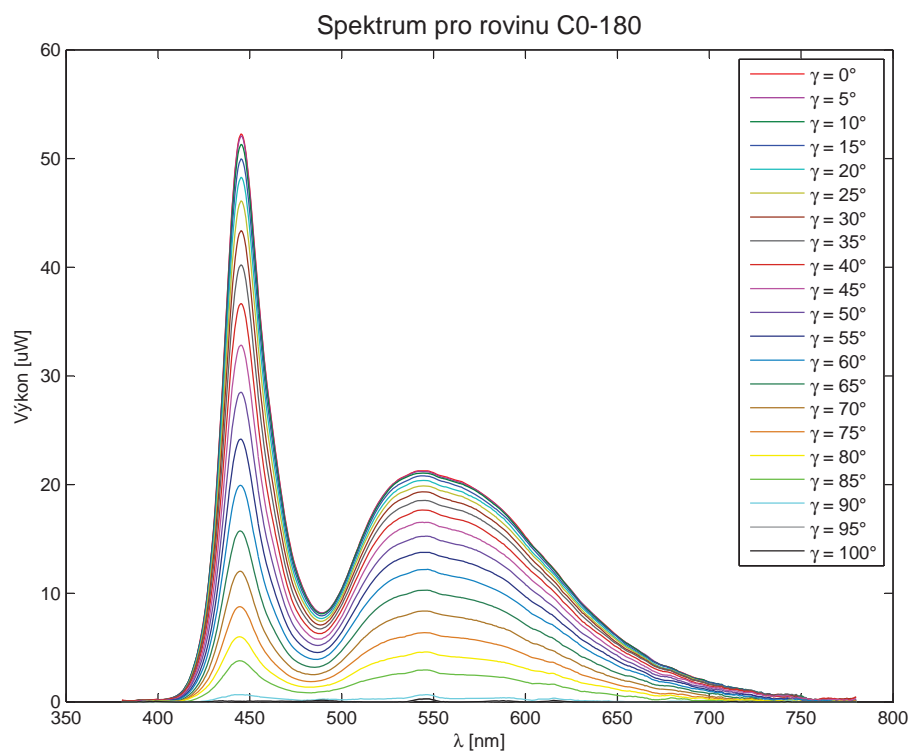




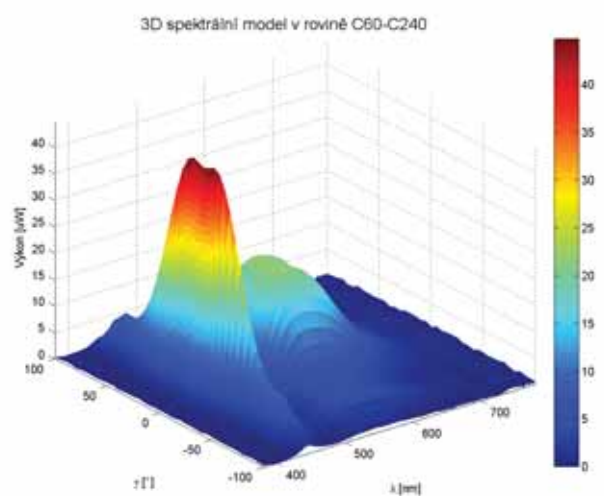
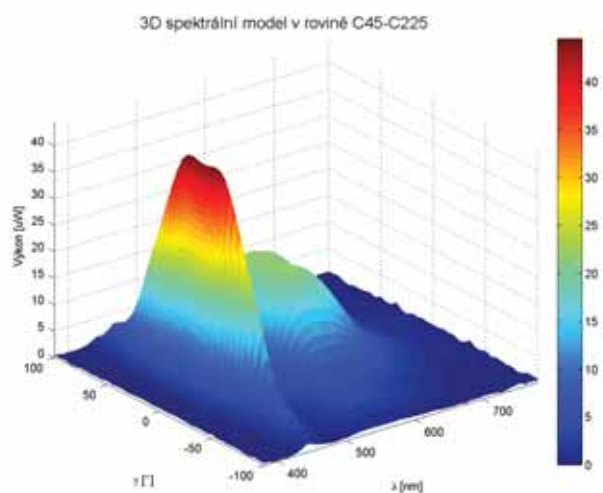
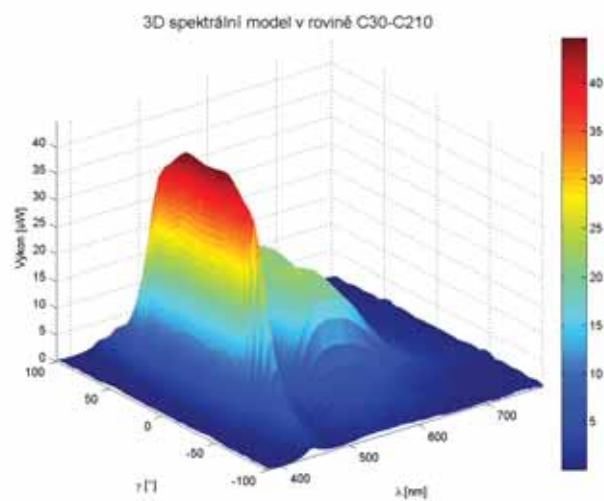
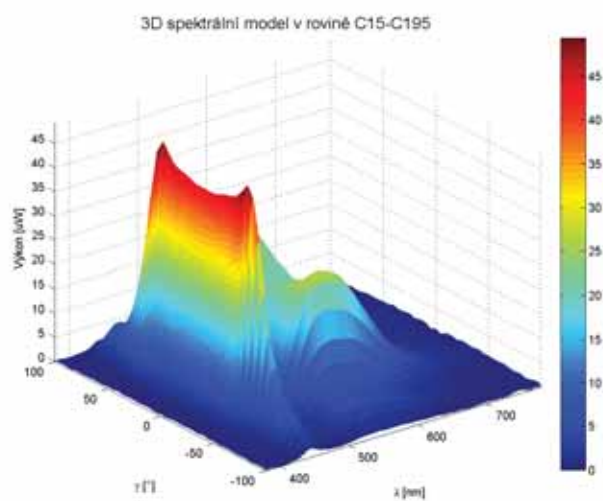
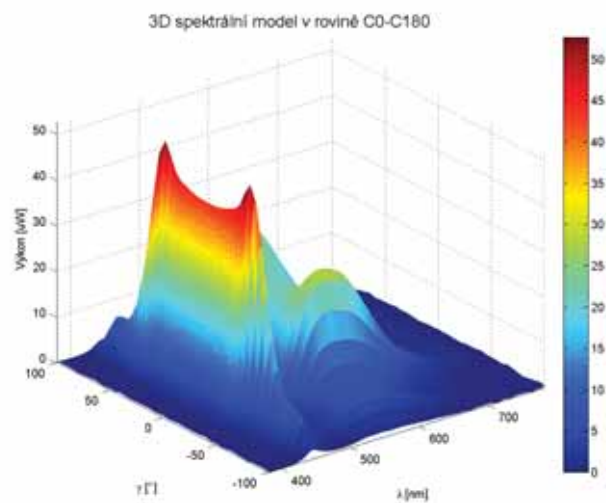
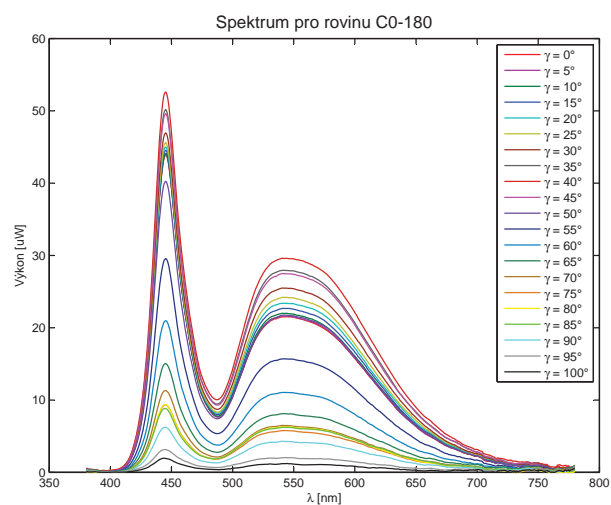
Příloha H-4: Spektrální průběhy LED XP-E s optickým modulem FA10708

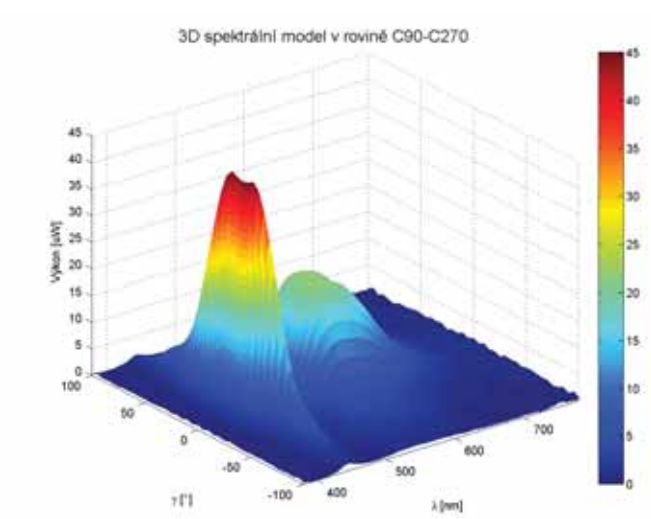
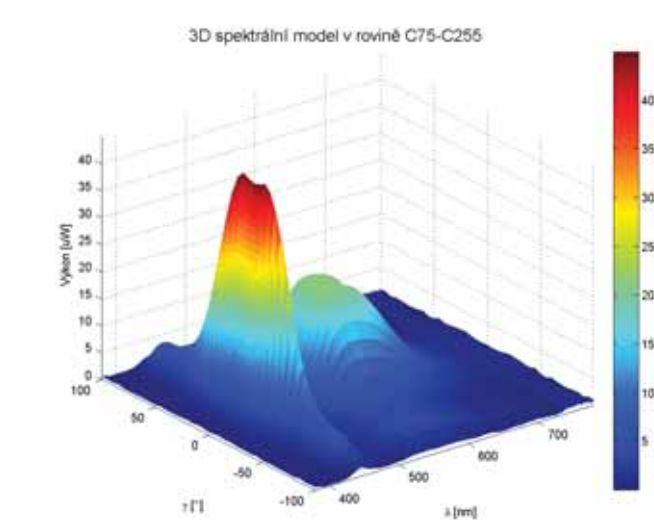


Příloha H-5: Spektrální průběh LED XP-G

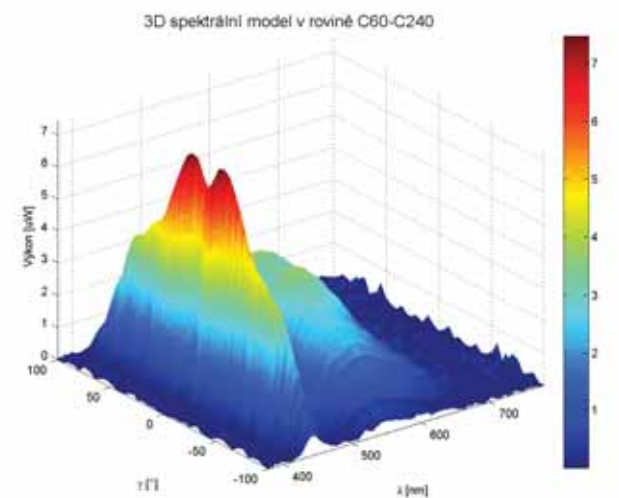
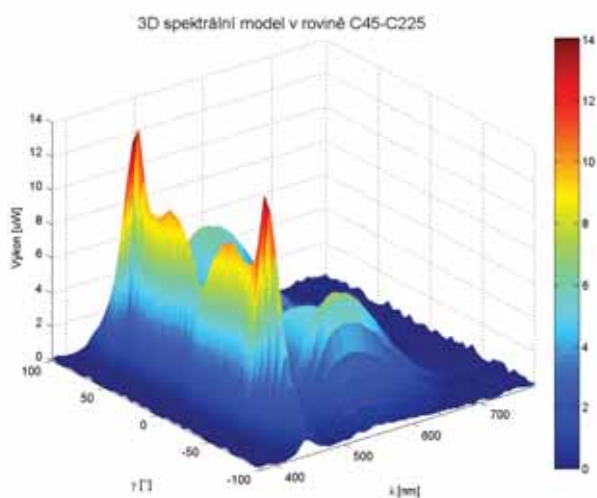
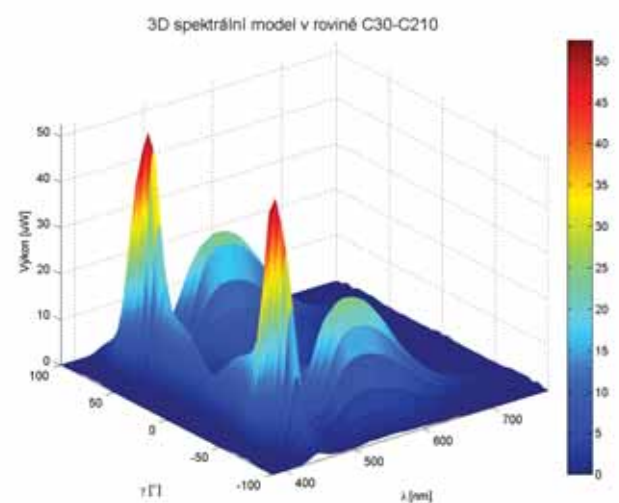
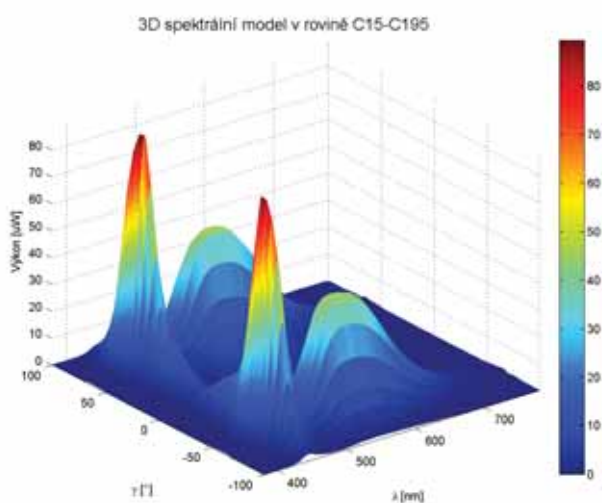
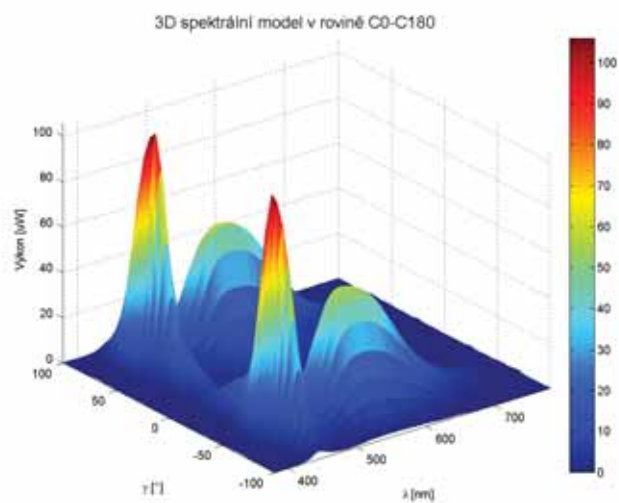
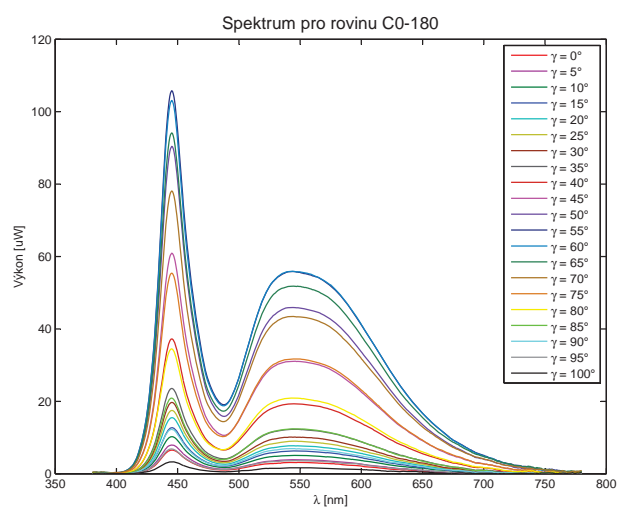


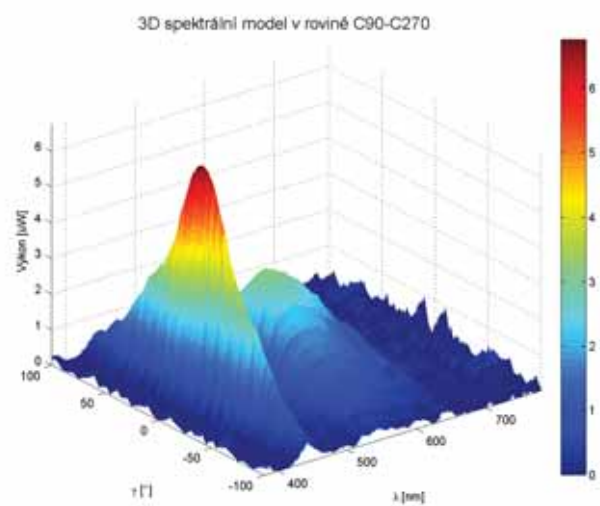
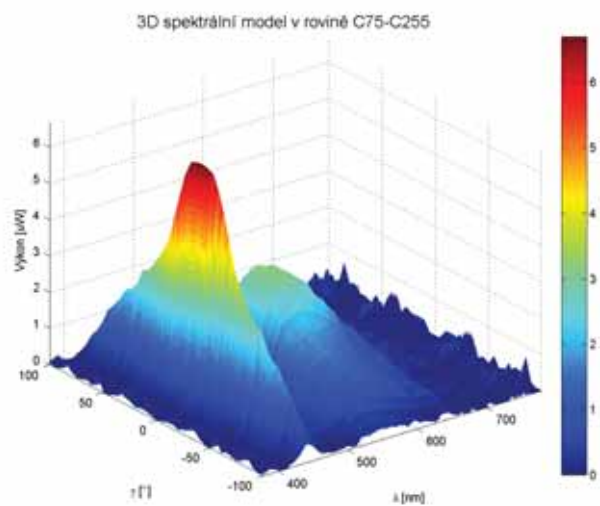
Příloha H-6: Spektrální průběhy LED XP-G s optickým modulem C11185



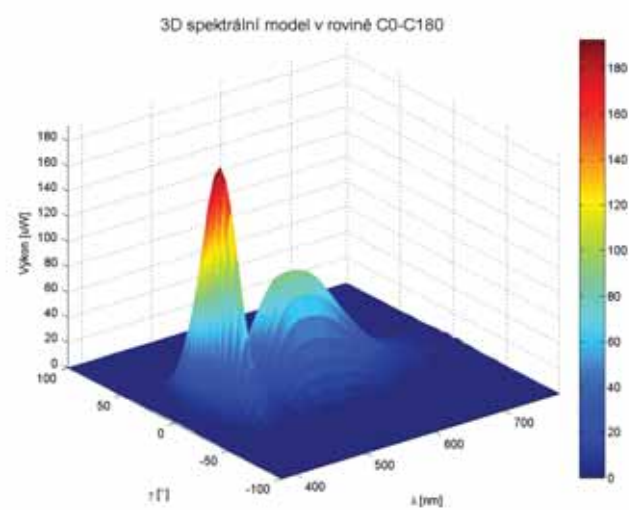
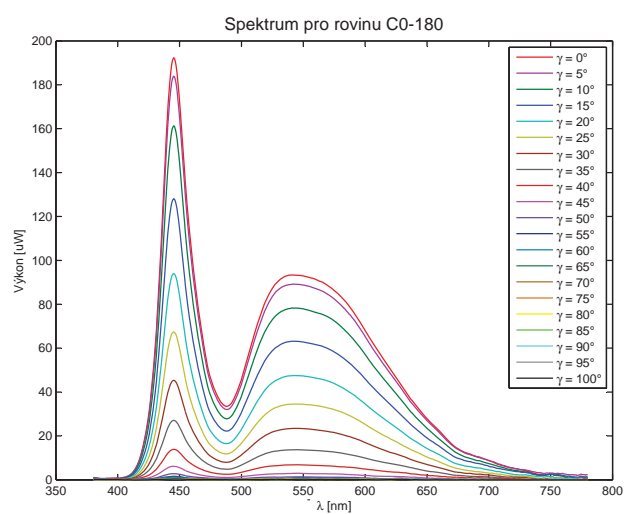


Příloha H-7: Spektrální průběhy LED XP-G s optickým modulem CA11256

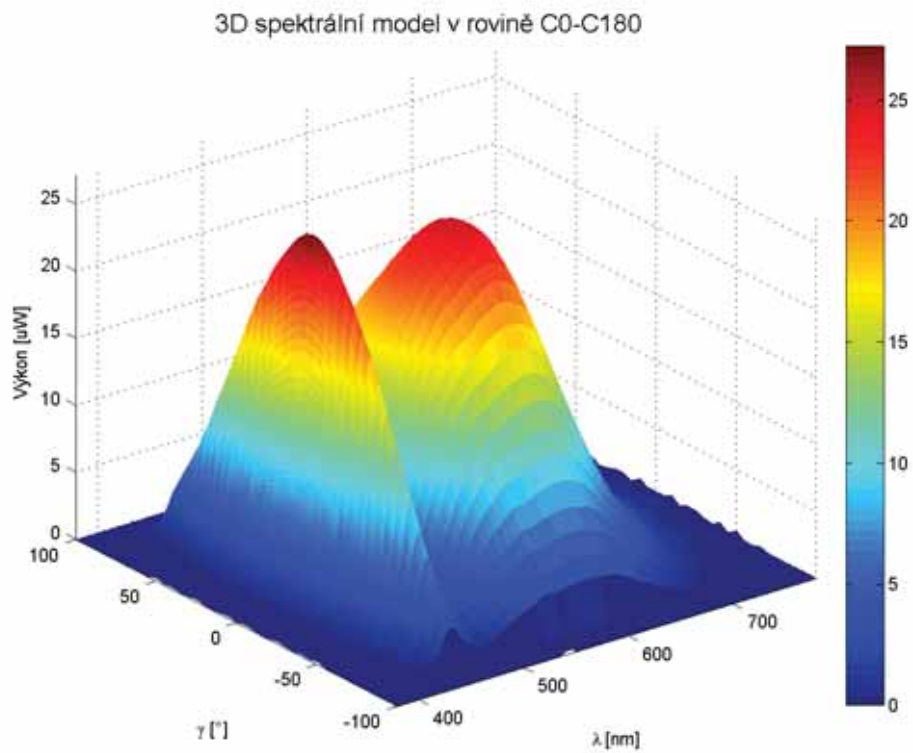
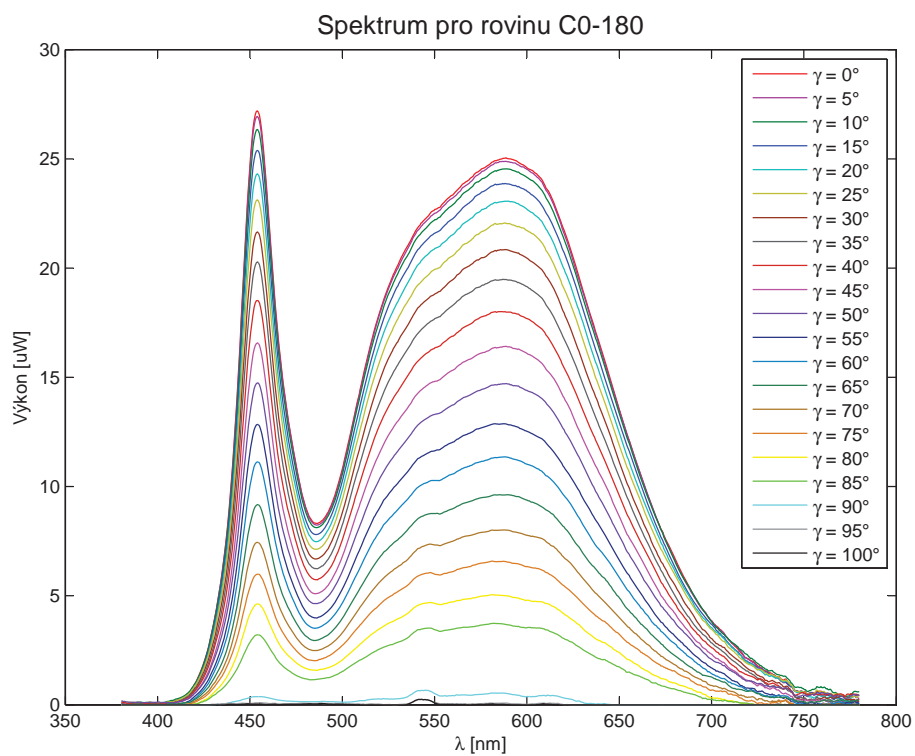




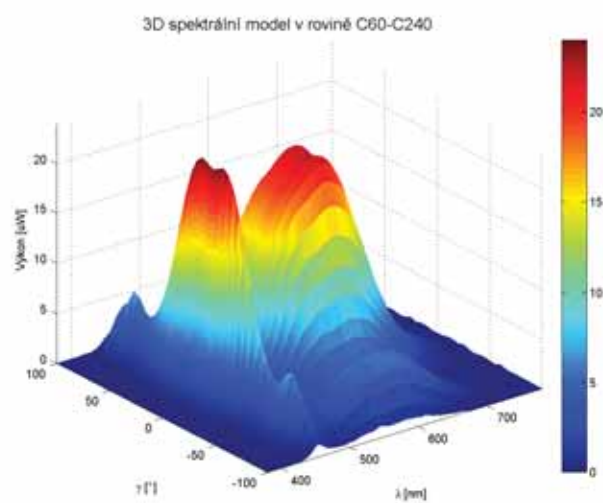
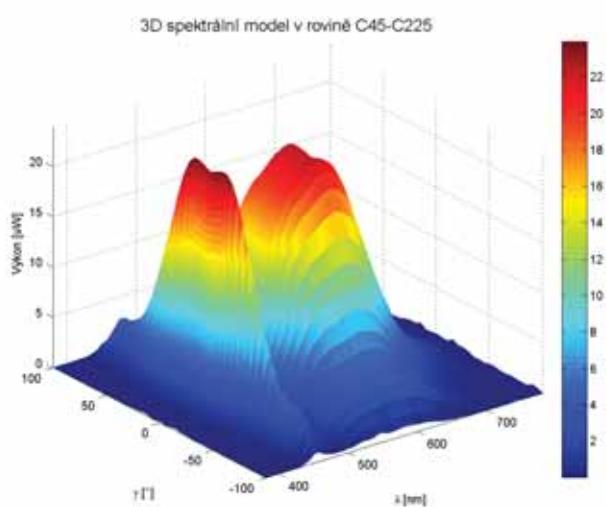
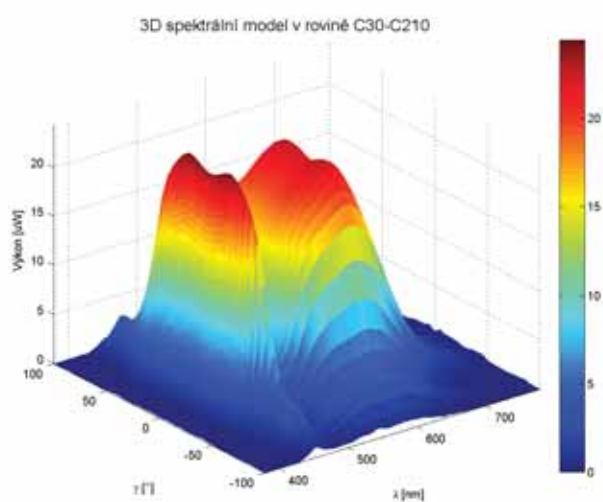
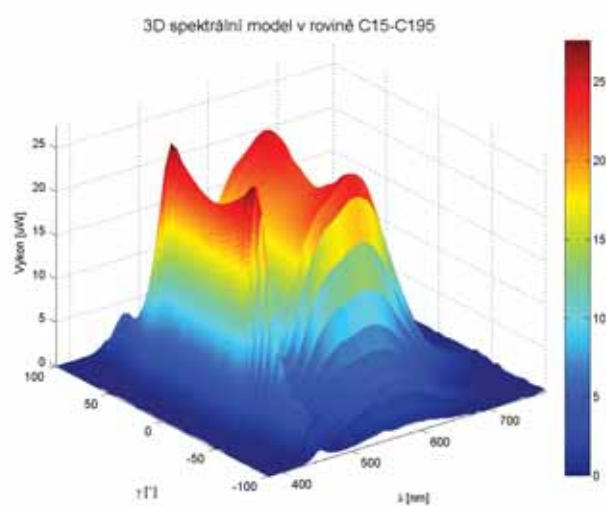
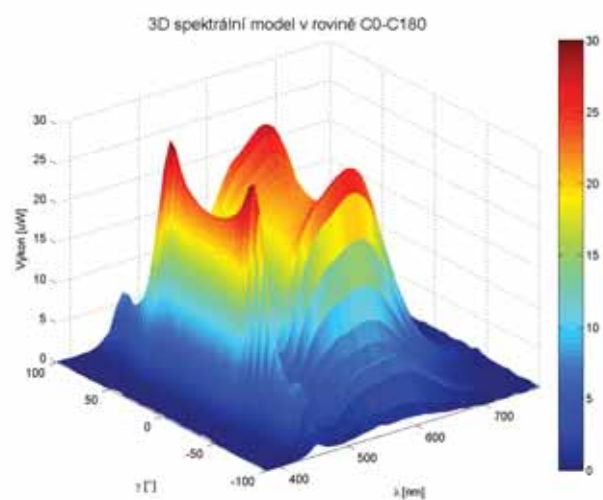
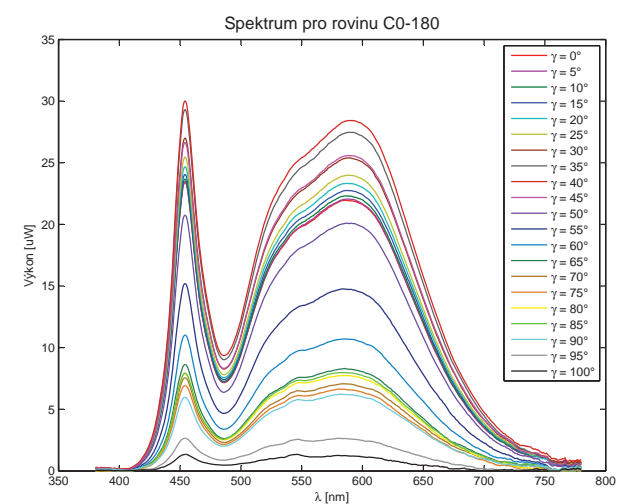
Příloha H-8: Spektrální průběhy LED XP-G s optickým modulem FA10708

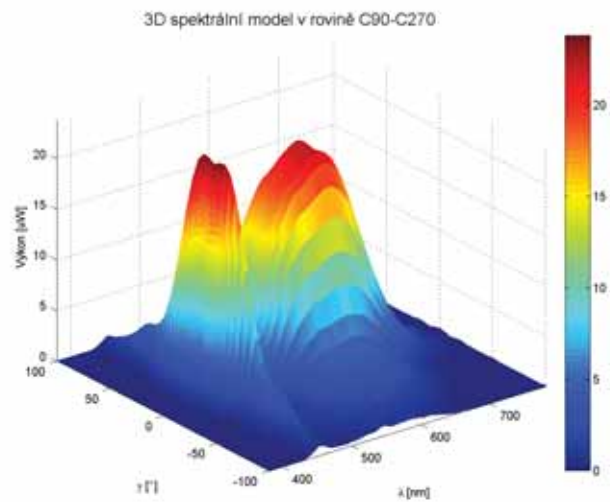
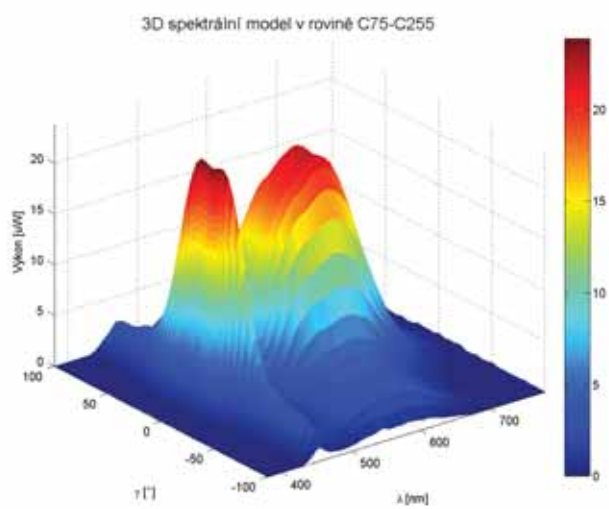


Příloha H-9: Spektrální průběh LED XT-E

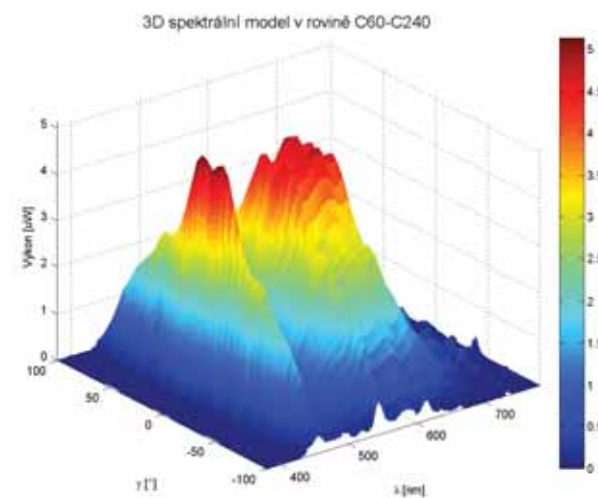
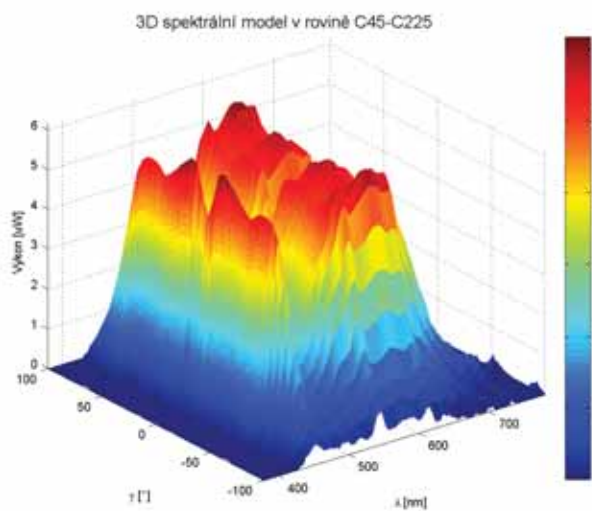
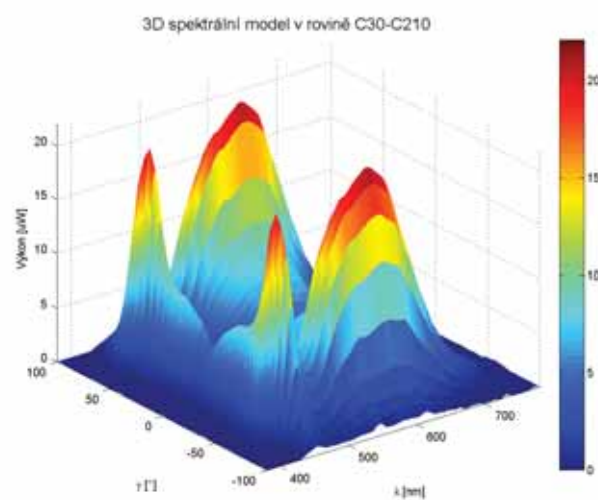
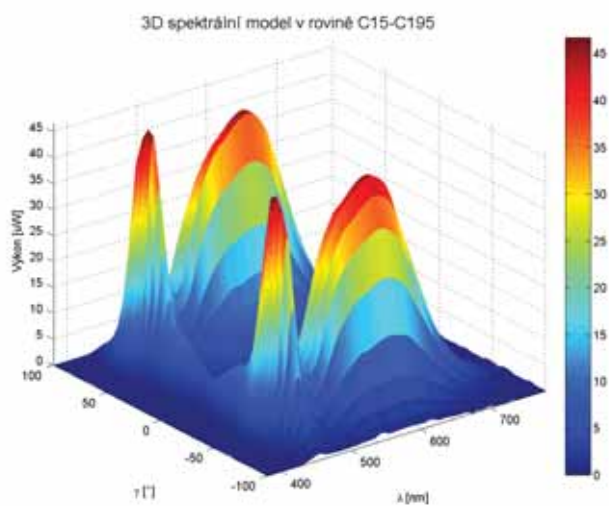
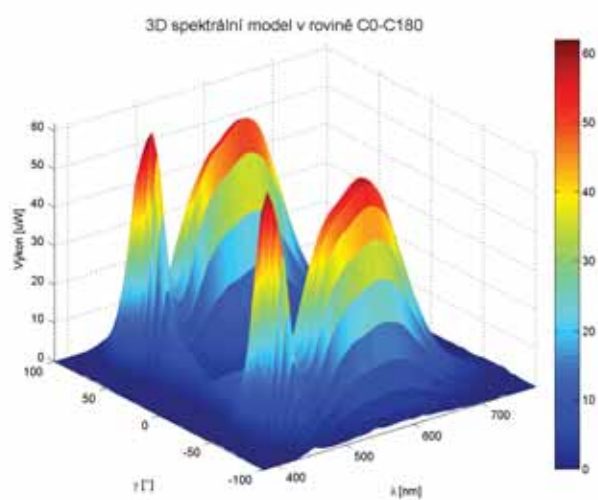
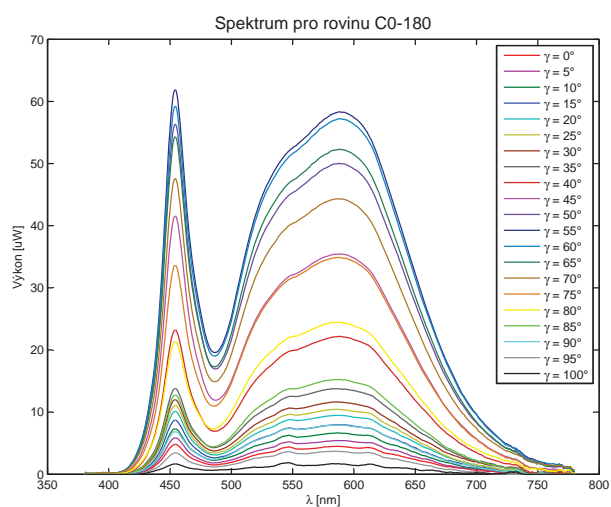


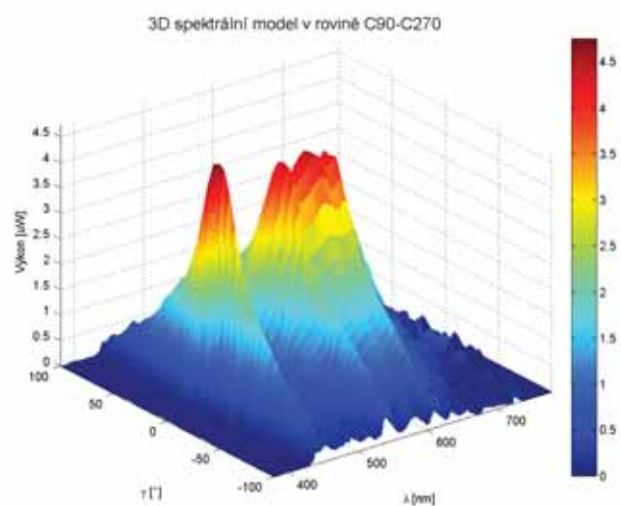
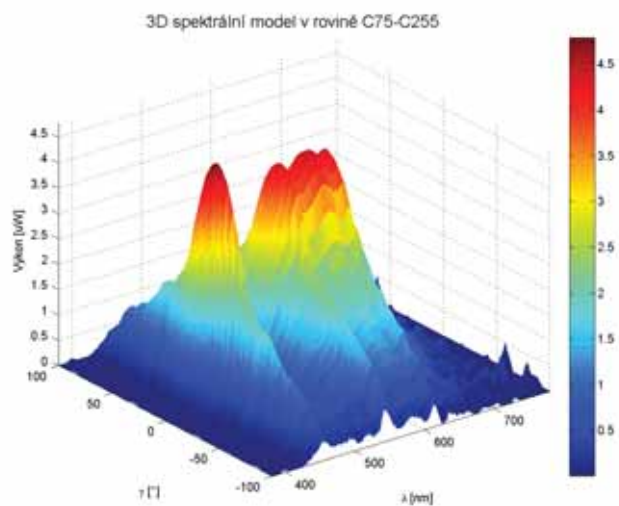
Příloha H-10: Spektrální průběhy LED XT-E s optickým modulem C11185



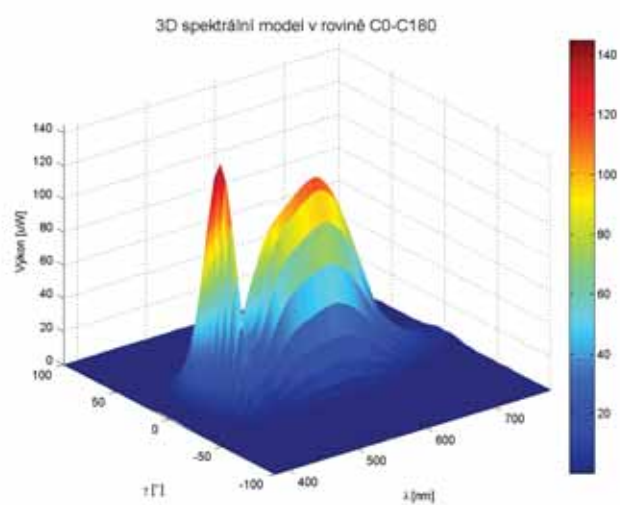
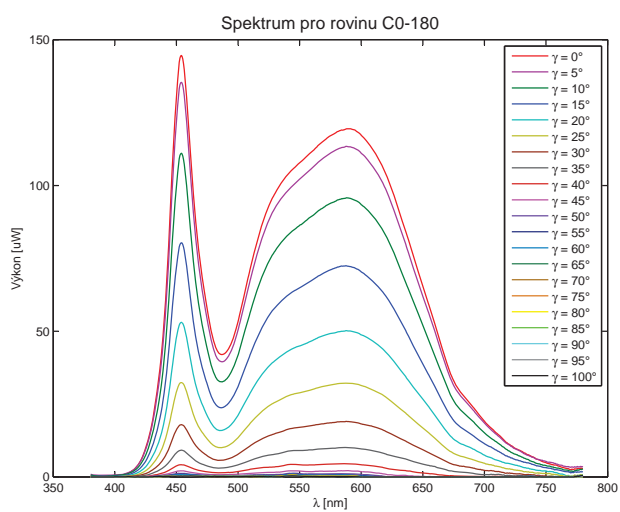


Příloha H-11: Spektrální průběhy LED XT-E s optickým modulem CA11256





Příloha H-12: Spektrální průběhy LED XT-E s optickým modulem FA10708



Příloha I-1: Tvorba 3D spektrálního modelu v Matlabu

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%                               LED XP-E s C11185      -- SPEKTRUM          %%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% @ By Bc. Jiří Dobiáš, VUT FEKT, Brno, CZECH REPUBLIC, EUROPE, EARTH, MILKY WAY  
%  
  
clc;  
close all;  
clear all;  
% skript za symbolem "-->" patri k predchozimu radku  
  
% ----- VSTUPNÍ DATA -----  
  
% !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
% !!!! JE POTREBA SPRAVNE NASTAVENI CESTY KE .XLS SOUBORUM !!!!!  
% !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
  
% vlnové délky  
L = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C0>List1_v2.xls', 1, 'A7:A704');  
  
% Naměřené amplitudy na vlnových délkách v úhlech a v prostoru načtené z .XLS  
  
C0 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C0>List1_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C15 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C15>List2_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C30 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C30>List3_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C45 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C45>List4_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C60 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C60>List5_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C75 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C75>List6_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C90 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C90>List7_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C180 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C180>List8_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C195 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C195>List9_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C210 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C210>List10_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C225 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C225>List11_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C240 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C240>List12_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C255 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C255>List13_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
C270 = xlsread('S:\DIPLOMKA\DATA\XP-E\XP-E s C11185\C270>List14_v2.xls', 1, 'B7:V704');  
  
% ----- VÝPOČTY -----  
%__Průměrné hodnoty z rovin C0-C180 ... _____  
  
C_0_180 = (C0+C180)/2;  
C_15_195 = (C15+C195)/2;  
C_30_210 = (C30+C210)/2;  
C_45_225 = (C45+C225)/2;  
C_60_240 = (C60+C240)/2;  
C_75_255 = (C75+C255)/2;  
C_90_270 = (C90+C270)/2;  
  
%__2D grafy průběhu vlnových délek v polorovinách C0 ... C90 _____  
% Matrix of color lines  
B = [  
1 0 0  
0.749019607843137 0 0.749019607843137  
0 0.498039215686275 0  
0 0 1
```

```

0 0.749019607843137 0.749019607843137
0.749019607843137 0.749019607843137 0
0.6 0.2 0
0.247058823529412 0.247058823529412 0.247058823529412
0.847058823529412 0.16078431372549 0
1 0 1
0.47843137254902 0.0627450980392157 0.894117647058824
0.0784313725490196 0.168627450980392 0.549019607843137
0.0431372549019608 0.517647058823529 0.780392156862745
0.168627450980392 0.505882352941176 0.337254901960784
0.682352941176471 0.466666666666667 0
0.870588235294118 0.490196078431373 0
1 1 0
0 1 0
0 1 1
0.501960784313725 0.501960784313725 0.501960784313725
0 0 0
];

% 2D GRAFY
figure (1)
set(1,'Color','white')
for i=1:21
plot(L, C_0_180(:,i),'Color',B(i,:));
hold on
end
title({'Spektrum pro rovinu C0-180'},'FontSize',14);
xlabel('\lambda [nm]');
ylabel('výkon [uW]');
legend ('\gamma = 0°','\gamma = 5°','\gamma = 10°','\gamma = 15°','\gamma = 20°','\gamma = 25°','\gamma =
--> 30°','\gamma = 35°','\gamma = 40°','\gamma = 45°','\gamma = 50°','\gamma = 55°','\gamma = 60°','\gamma =
--> 65°','\gamma = 70°','\gamma = 75°','\gamma = 80°','\gamma = 85°','\gamma = 90°','\gamma =
--> 95°','\gamma = 100°');

% ... Pokracovani skriptu s dalsimi 2D grafy vykreslujici roviny C

%___3D grafy průběhu vlnových délek v polorovinách C0 ... C90 _____

%Matice vlnových délek
for i=1:41
    V(:,i)=L;
end

% Úhly v polorovinách
G = [linspace(-100,100,41)];
for i=1:698
    U(i,:)=G;
end

% 3D zobrazení průběhu vlnových délek v úhlech poloroviny C0-C180
Z = [flip1r(C_0_180(1:698,2:21)) C_0_180];
X=V;
Y=U;
Z=-Z;
A=max(max(C_0_180));
figure (8)
set(8,'Color','white')
surf(X,Y,-Z);
title({'3D spektrální model v rovině C0-C180'},'FontSize',14);
xlabel('\lambda [nm]');
ylabel('\gamma [°]');
zlabel('výkon [uW]');
axis([380 780 -100 100 0 A])
colorbar
shading flat

% ... Pokracovani skriptu s dalsimi 3D grafy vykreslujici roviny C

```

Příloha J-1: Přehled parametrů optických modulů

Tab. 1: Přehled parametrů měřených optických modulů dle výrobce

Číslo vzorku	Název optického modulu	Typ	FWHM [°]	LED	Účinnost [%]	cd/lm
1	C10757_Strada-DW-XR	čočka	80+126	XR-E	92	-
2	C10924_STRADA-B	čočka	84+34	XR-E	93	1,02
3	C10966_STRADA-C	čočka	97	XR-E	93	0,35
4	C11185_Strada-DN-XR	čočka	104+65	XP-E	92	0,39
5	CA10823_STRADA-A	čočka	68+136	XP-E	93	1,1
6	CA10927_STRADA-B	čočka	116+44	XP-E	93	0,56
7	CA10932_FLARE-B	čočka	102+10	XP-E	93	1,75
8	CA11256_STRADA-DW	čočka	90+140	XP-E	92	1,03
9	FA10343_CRS-WW	sestava	59	XR-E	-	0,78
10	FA10665_CXP-M	sestava	30	XP-E	83	2,11
11	FA10708_CXP-W	sestava	31	XP-E	79	1,63
12	FCA10306_CRS-O	sestava	44+13	XR-E	78	3,2
13	FCA10328_CRS-SS	sestava	12	XR-E	-	13,65

Zdroj: <http://www.ledil.com> (Hodnoty jsou převzaty z datasheetů optických modulů)

Tab. 2: Přehled maximálních naměřených hodnot cd/lm optických prvků dle typu LED

Vzorek	XP-E	XP-G	XT-E
-	cd/lm	cd/lm	cd/lm
LED	0,32	0,29	0,32
1	1,45	1,16	1,12
2	0,95	0,83	0,79
3	0,29	0,26	0,27
4	0,42	0,40	0,37
5	1,12	0,88	0,89
6	0,54	0,51	0,53
7	1,10	1,02	0,72
8	0,95	0,77	0,77
9	1,07	1,04	1,03
10	2,89	2,98	2,83
11	1,67	1,29	1,57
12	2,57	2,64	2,12
13	7,38	6,34	4,57